

Estudio de propiedades mecánicas en láminas de fibra de carbono fabricadas mediante el proceso
de laminación para elementos aeronáuticos

John Mario Martínez Benavides, ✉ johmarmartinez@utp.edu.co

Luis Alberto Vargas Martínez, ✉ luis_aberto@utp.edu.co

Trabajo de Grado presentado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Asesor: Adonái Zapata Gordon, Magíster (MSc) en Ingeniería Aeronáutica.



Universidad
Tecnológica
de Pereira

Universidad Tecnológica de Pereira

Facultad de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Pereira, Colombia

2019

Citar/How to cite	[1]	
Referencia/Reference	[1]	J. M. Martínez Benavides, L. A. Vargas Martínez, “Estudio de propiedades mecánicas en láminas de fibra de carbono mediante el proceso de laminación para elementos aeronáuticos.”, Tesis Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ciencias Básicas, 2019.
Estilo/Style: IEEE (2014)		

Agradecimientos

El agradecimiento a Dios y nuestras familias que lucharon y trabajaron fuertemente para que el anhelo de obtener el título como ingenieros sea una realidad, a todos las personas que han intervenido a lo largo de nuestro estudios y en especial a los docentes, que trabajan devocionalmente en su labor como transmisores de conocimiento y guías de esta profesión que decidimos elegir como herramienta para enfrentar la vida y los retos que ésta presentará en adelante.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	12
ABSTRACT	13
1. DESCRIPCION DEL PROYECTO	14
1.1. INTRODUCCIÓN	14
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	16
1.3. OBJETIVOS.....	17
1.3.1. Objetivo general.....	17
1.3.2. Objetivos específicos	17
2. CONCEPTO DE MATERIALES COMPUESTOS.....	18
2.1. Matriz:	18
2.1.1. Matriz metálica	18
2.1.2. Matriz cerámica	18
2.1.3. Matriz polimérica.....	18
2.1.3.1. Termoplásticos:	18
2.1.3.2. Termoestables:	18
2.2. Tipos de Resinas.....	19
2.2.1. Resina poliéster:	19
2.2.2. Resinas viniléster:	19
2.2.3. Resinas epoxi:	20
2.2.3.1. Propiedades de la resina epoxi:	20
2.2.3.2. Proceso de secado de la resina:	21
2.2.3.3. Tiempo de trabajo:	21
2.2.3.4. Fase de endurecimiento:.....	22

2.2.3.5. Secado final:	22
2.3. Materiales de refuerzo:	22
2.4. Tipos de laminados:	24
2.4.1. Los laminados unidireccionales	24
2.4.2. Los laminados ortótropos	25
2.4.3. Los laminados cuasi-isótropos	25
2.5. Métodos de Fabricación de Piezas con Materiales Compuestos	27
2.5.1. Moldeo por contacto	27
2.5.1.1. Laminado manual	27
a) Preparación del molde	28
b) Preparación del refuerzo	28
c) Aplicación del gelcoat	29
d) Preparación de la resina	29
e) Realización del estratificado	29
f) Endurecimiento	29
g) Desmoldeo	29
h) Desbarbado y acabado final	30
i) Control de calidad	30
2.5.1.2. Moldeo por proyección simultánea	31
2.5.1.3. Moldeo con impregnadores	32
2.5.2. Técnicas de moldeo asistidas por vacío	33
2.5.2.1. Laminado manual asistido por vacío	35
2.5.3. Moldeo con autoclave	36
3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PROBETAS	39
3.1. Antecedentes	39

3.2. Esquema de configuración de probetas	39
3.3. Proceso de elaboración de probetas	44
3.3.1. Materiales a utilizar:	45
3.3.2. Preparación del área de trabajo:	45
3.3.3. Adecuación de elementos de trabajo y fibra de carbono	47
3.3.4. Proceso de laminación manual asistida por vacío.....	51
3.3.5. Desmoldeo:	53
3.3.10. Corte de probetas.....	54
3.3.11. Producción de nuevas probetas	54
4. PRUEBAS DE RESISTENCIA PARA EVALUACION DE PROPIEDADES MECÁNICAS	56
4.1. Prueba de tracción	56
4.2. Prueba de flexión.....	57
5. RESULTADOS OBTENIDOS	59
5.1. Probetas obtenidas.....	59
5.1.1. Probetas apenas laminadas.....	59
5.1.2. Después de hacer pruebas de tracción	62
5.2. Graficas obtenidas.....	64
5.2.1. Gráfica de esfuerzo vs número de capas.....	64
5.2.2. Gráfica de esfuerzo vs deformación	67
5.2.2.1. Gráfica de esfuerzo vs deformación de probetas con igual cantidad de capas.	67
5.2.2.2. Gráfica de esfuerzo vs deformación con la misma orientación de fibras.....	70
6. ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	73
7. CONCLUSIONES.....	77
RECOMENDACIONES.....	79

REFERENCIAS80

ANEXOS84

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de pruebas según el tipo de probeta. [Autores]	58
Tabla 2. Dimensiones de las probetas de fibra de carbono. [Autores]	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva Exotérmica. [4].....	21
Figura 2. Laminado unidireccional [7]	25
Figura 3. Laminado ortótropo [6].....	25
Figura 4. Laminado cuasi-isotrópico [7]	26
Figura 5. Tejido Tafetán. [8]	27
Figura 6. Laminado manual [9].....	28
Figura 7. Moldeo por proyección simultánea. [10].....	31
Figura 8. Esquema equipo de impregnación manual. [4].....	33
Figura 9. Esquema equipo de impregnación manual asistida por vacío. [1].....	36
Figura 10. Esquema sistema de moldeo con autoclave. [11]	37
Figura 11. Apilamiento de fibras con configuración (0-90) y (-45+45°).....	40
Figura 12. Apilamiento de fibras con configuración (0-90°) y (-45°+45°).....	40
Figura 13. Diseño de configuración de probetas iniciando con fibras orientadas a +45 y -45° con fibra 3K	41
Figura 14. Diseño de configuración de probetas iniciando con fibras orientadas a 0° y 90° con fibra 3K	42
Figura 15. Diseño de configuración de probetas utilizando solo fibras orientadas 0 y 90° con fibra 6K	43
Figura 16. Apilamiento en forma de sándwich para probetas sometidas a pruebas de flexión.	44
Figura 17. Limpieza de vidrio. [Autores].....	46
Figura 18. Delimitación del área de trabajo. [Autores]	46
Figura 19. Secado del alcohol polivinílico por medio de pistola de calor. [Autores]	47
Figura 20. Tabla perforada. [Autores].....	48
Figura 21. Manta de absorción. [Autores].....	48
Figura 22. Plástico desmoldante. [Autores]	49
Figura 23. Plástico de vacío. [Autores]	49
Figura 24. Corte de fibra de carbono. [Autores]	50

Figura 25.laminas cortadas para probetas de tracción. [Autores]	50
Figura 26. Pegado de cinta taki pei. [Autores]	51
Figura 27. Aplicación de resina sobre la fibra de carbono. [Autores]	52
Figura 28. Aplicación de vacío sobre la superficie laminada. [Autores]	53
Figura 29. Desmoldeo de la fibra de carbono. [Autores]	53
Figura 30. Probetas de fibra de carbono. [Autores]	54
Figura 31. Esquema del proceso de fabricación. [Autores]	55
Figura 32. Máquina Universal de ensayos: ZD 40 WPM Leipzig	56
Figura 33. Máquina de ensayos IBERTEST UMIB-600-S.	57
Figura 35. Probeta de fibra de carbono con nucleo de madera balso. [autores].....	60
Figura 36. Prueba de flexión para probeta de fibra de carbono con núcleo de madera balso. [Autores].....	61
Figura 37. Probetas obtenidas en primer laminado con disposición (0-90°) fibra 6K. [autores]..	61
Figura 38. Probeta de fibra de carbono sometida a prueba de tracción. [Autores]	62
Figura 39. Gráfica de Esfuerzo vs número de capas con orientación de fibras 90-45°. [Autores] ..	62
Figura 40. Destrucción de probeta de fibra de carbono con madera balsa al someterla a prueba de flexión. [Autores].	63
Figura 41. Probeta fisurada después de prueba de flexión.[Autores].....	63
Figura 42. Probetas fracturadas después de prueba de tracción.[Autores].....	64
Figura 43. Destrucción de probetas de fibra de carbono por método de tracción. [Autores]	64
Figura 44. Gráfica de Esfuerzo vs número de capas con orientación de fibras 90-45°. [Autores] ..	65
Figura 45. Gráfica de Esfuerzo vs número de capas con orientación de fibras 45-90°. [Autores] ..	66
Figura 46. Gráfica de Esfuerzo vs número de capas con orientación de fibras 0-90°- fibra 6K. [Autores].....	66
Figura 47. Gráfica de Esfuerzo vs número de capas de todas las probetas fabricadas. [Autores] ..	67
Figura 48. Descripción de codificación de probetas.	68
Figura 49. Gráfica de Esfuerzo vs deformación de 3 capas. [Autores]	68
Figura 50. Gráfica de Esfuerzo vs deformación de 4 capas. [Autores]	69
Figura 51. Gráfica de Esfuerzo vs deformación de probetas de 5 capas. [Autores]	69
Figura 52. Gráfica de Esfuerzo vs deformación con orientación de fibras 90-45°. [Autores].....	70
Figura 53. Gráfica de Esfuerzo vs deformación con orientación de fibras 45-90°. [Autores].....	70

Figura 54. Gráfica de Esfuerzo vs deformación. [Autores]71

Figura 55.Grafica de fuerza vs deformación para acero 4140. [Autores]71

Figura 56. Grafica de fuerza deformación de fibra de carbono con núcleo de madera balso.
[Autores].....72

Figura 57. Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4. [15]75

RESUMEN

En este documento se realiza un estudio de propiedades mecánicas en láminas de fibra de carbono fabricadas mediante el proceso de laminación para elementos aeronáuticos. Se habla de algunos de los procesos de fabricación de piezas a partir de fibra de carbono y resina epóxica (materiales compuestos), enfatizando en laminado manual asistido por vacío, se describe paso a paso este método de elaboración de probetas, a dichas probetas se realizaron algunas pruebas de resistencia. Las pruebas de tracción se aplicaron a varias probetas con diferente disposición de fibras (0, 90 y 45°) con el fin de analizar y concluir cual es la disposición que me proporciona las mejores propiedades mecánicas. Se analiza el comportamiento de las probetas de fibra de carbono sometidas a tracción, a partir de la comparación de graficas tales como: *esfuerzo vs deformación* y *numero de láminas vs esfuerzo máximo* y se compararon con un aluminio 2024 y un acero 4140, obteniendo muy buenas aproximaciones, tomando como referencia el estado del arte de la información recolectada previamente durante el proceso de investigación.

Palabras clave: Materiales compuestos, fibra de carbono, propiedades mecánicas.

ABSTRACT

In this document a study is carried out about the mechanical properties of carbon fiber plates manufactured by the lamination process for aeronautical parts. It covers some of the processes of manufacturing of pieces and parts from carbon fiber and epoxy resin (composite materials), emphasizing vacuum-assisted manual lamination; it describes the necessary steps for this method of elaborating specimens. The specimens are subjected to resistance tests. The traction tests are applied to various specimens with different fiber layers (0, 90, and 45) in order to analyze and conclude which layer can give the best mechanical properties. The behaviors of the carbon fiber specimens that are subjected to traction are analyzed. From the comparisons of the graphs such as: stress vs. deformation and number of sheets vs. maximum strength (stress), is later compared with aluminum 2024 and steel 4140, obtaining very good approximations, taking as reference the information collected previously during the process of the investigation.

Keywords: composite materials, carbon fiber, mechanical properties.

Capítulo 1

1. DESCRIPCION DEL PROYECTO

1.1. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos son aquellos que están formados por la unión de dos o más materiales, dicha unión permite obtener propiedades que no se tienen en los materiales originales. Los compuestos pueden seleccionarse para lograr combinaciones poco usuales en cuanto a rigidez, resistencia, peso, rendimiento a alta temperatura, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad etc. En la actualidad los materiales compuestos están teniendo gran acogida en las grandes industrias debido a sus espléndidas propiedades, industrias como: la industria de transporte terrestre (carros, motocicletas) o la misma aeronáutica (aviones, drones). La aeronáutica está en constante estudio y desarrollo de piezas que le permitan fabricar vehículos más ligeros y que brinden mayor seguridad a la hora del vuelo; es por eso que se está optando por fabricar piezas a partir de fibra de carbono y una matriz de resina epóxica.

La interacción de estos dos materiales se lleva a cabo mediante un método llamado laminación que consiste en el apilamiento de pequeñas láminas de fibra de carbono, utilizando como adherente la resina epóxica hasta obtener el espesor deseado. Existen diferentes tipos de laminado tales como: laminación manual, infusión, transferencia de resina moldeada, moldeo por transferencia de resina, laminación manual asistida por vacío, entre otros. Para este trabajo se utilizará el proceso de laminación manual asistida por vacío debido a que este es uno de los métodos que proporciona mejores propiedades mecánicas a las piezas a fabricar; también se utiliza debido a que otros métodos resultan ser complejos y costosos.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En nuestro país existe muy poca información y acceso en cuanto a trabajos a base de fibra de carbono, una de las razones, se debe a los altos costos de importación y la complejidad que implica la importación en grandes cantidades tanto de la fibra, así como también de la resina epóxica. En el caso de la resina epóxica, al ser un material inflamable, en la aduana los controles resultan ser más tediosos y rigurosos. Es debido a esto, que procesos como el de laminación de fibra de carbono a base de resina epóxica, se han explorado muy poco en Colombia y esto se ve reflejado en la poca información que se encuentra al respecto. Con base a esto, se tomó la iniciativa de explorar trabajos con fibra de carbono utilizando la laminación, con la intención de iniciar y obtener una información más detallada que nos permita trabajar en otras áreas que tienen acogida en el desarrollo de piezas a base de materiales compuesto como lo es la aeronáutica y la industria automotriz.

Con la obtención de las propiedades mecánicas de láminas de fibra de carbono es posible realizar una exploración en el área de fabricación de piezas para vehículos por moldeo, lo cual a día hoy, se está dando gran importancia en la fabricación de dichas piezas debido a que se obtienen piezas con propiedades mecánicas muy buenas y con muy bajo peso. Las piezas o elementos al ser más pesados, generan un aumento considerable de energía a la hora de moverse o ser manipulados; así también, las piezas o elementos que tienen poca resistencia de acuerdo con el trabajo en el que se va a utilizar, se convierten en problemas de seguridad, tanto para maquinas o el mismo ser humano. De ahí radica la importancia del estudio de materiales alternativos que permitan mejorar notablemente en todos los aspectos.

1.2. JUSTIFICACIÓN

La investigación de nuevas alternativas que involucren una evolución en cuanto a rendimiento, comodidad y mejora en las propiedades de los elementos o máquinas que hacen de nuestra vida más práctica y que facilitan muchas de nuestras labores cotidianas, está tomando gran relevancia. Los materiales compuestos, son una excelente alternativa para la fabricación de muchos de estos elementos. Antes de utilizar un material en la fabricación de elementos que sirvan para nuestro uso, es necesario realizar un análisis de sus propiedades ya que a partir de eso, es posible determinar para qué tipo de elemento puede resultar útil su composición y propiedades.

Los materiales compuestos como su nombre lo indica, son la unión de 2 o más elementos, los cuales tienen la particularidad de poseer en su composición las propiedades que cada elemento posee de forma individual como por ejemplo la fibra de carbono con resina epóxica, la cual se utiliza mucho en campos del deporte, la industria, entre otras. Las propiedades de los elementos fabricados en fibra de carbono actualmente son importantes en la industria del transporte terrestre (carros, motocicletas, bicicletas, entre otros), o la misma aeronáutica. De todo lo expuesto anteriormente, radica la importancia del estudio de estos materiales y la aplicación que se le puede dar gracias a los estudios que se hayan realizado hasta el día de hoy.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Evaluar las propiedades mecánicas a láminas de fibra de carbono con matriz de resina fabricadas mediante el proceso de laminación.

1.3.2. Objetivos específicos

- Buscar y seleccionar en repositorios institucionales, revistas comerciales, patentes referentes al tema.
- Diseñar las variantes para la fabricación de las probetas y evaluar las propiedades mecánicas.
- Fabricar probetas según normatividad
- Evaluar las probetas en ensayos destructivos para el análisis de las propiedades mecánicas según norma internacional.

CAPITULO 2

2. CONCEPTO DE MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos son la combinación de dos o más elementos diferentes, en forma y composición a escala macroscópica, logrando mejorar las propiedades que no son posibles de obtener si se tiene cada uno de los constituyentes por separado. Los constituyentes no se disuelven ni se funden completamente, aunque actúan en conjunto y pueden ser identificados fácilmente. [1]

Los materiales compuestos suelen estar constituidos por dos fases independientes: **matriz** y **refuerzos**.

2.1. Matriz:

La matriz es la encargada de proteger de los factores externos y transmitir los esfuerzos al componente reforzante, establecer cohesión en el material y se pueden encontrar en diferentes tipos como matrices metálicas, cerámicas, y poliméricas.

2.1.1. Matriz metálica: Son materiales de aleaciones ligeras (Al, Ti o Mg) reforzados con fibras o partículas. [2]

2.1.2. Matriz cerámica: Son aquella que está conformada por sólidos inorgánicos no metálicos como vidrio, silicatos, alúmina y carburo de silicio. [3]

2.1.3. Matriz polimérica: Son las más comunes y están conformadas por plástico o polímeros reforzados con fibras, se pueden clasificar en dos grandes grupos:

2.1.3.1. Termoplásticos: Son polímeros que al calentarse a determinadas temperaturas se convierten en fluidos, permitiendo ser moldeadas en la forma deseada, que quedará preservada al enfriarse.

2.1.3.2. Termoestables: Son polímeros que no pueden fluir por efecto de la temperatura para ser remodelados. Molecularmente hablando tienen una estructura entrecruzada y por lo tanto tienden a ser resinas de mucha rigidez, y al someterlos a temperatura elevada promueve la descomposición química del polímero. A temperatura ambiente son duros y frágiles.

2.2. Tipos de Resinas

Existen diferentes tipos de resina según su composición:

2.2.1. Resina poliéster:

Son las resinas más utilizadas, debido a su bajo costo a comparación de otras matrices, son muy utilizadas en la construcción de embarcaciones. Durante el endurecimiento tienden a contraerse (entre el 6 y el 10%), siendo este uno de sus puntos débiles. En las resinas de poliéster el acelerante o acelerador se llama octoato de cobalto y el catalizador se llama mek (metil-etil-cetona) peróxido. La Caducidad aproximada de la resina de poliéster es de 6 meses. Si se ha abierto el envase la vida del producto será mucho menor. Para su conservación se debe evitar la humedad, la alta temperatura y la luz solar. Tiene una ebullición inferior a los 60° C, su disolvente que es el estireno, tiene un punto de inflamación de 33° por ello es muy recomendable guardar las resinas lejos de cualquier foco inflamable.

Tipos de resinas poliéster:

Dependiendo del tipo de alcoholes y ácidos de los que se parta, se obtienen diferentes tipos de resinas poliéster. Según la naturaleza de sus monómeros constituyentes, se dividen en:

Ortoftálicas: Constituyen las más frecuentes y las de menor coste entre las resinas de poliéster. Absorben hasta un 2.5% de agua en inmersiones prolongadas. De utilización general.

Isoftálicas: Tienen mejores propiedades mecánicas que las ortoftálicas, y mejor resistencia en ambientes marinos (menor absorción). La mayoría de gel coats de uso naval se formulan en base isoftálica.

Bisfenólicas: Tienen mejores propiedades mecánicas y químicas que las resinas ortoftálicas e isoftálicas, aunque un elevado coste. Es la resina más idónea entre las poliéster para medios corrosivos. [4]

2.2.2. Resinas viniléster:

Las resinas viniléster se pueden encontrar en un nivel intermedio entre la resina epoxi y la poliéster, ya que las resinas epoxi toman las buenas propiedades físico- químicas y las resinas poliéster heredan sus ciclos de secados relativamente cortos. Estas resinas son el resultado de una reacción de poliadición de una resina epoxi sobre un ácido insaturado acrílico o metacrílico, que

proporciona una insaturación en su cadena. De una manera análoga a las resinas de poliéster, el material extraído de esta reacción se disuelve en estireno para reducir su viscosidad y facilitar su empleo en procesos posteriores. Las resinas viniléster poseen mejores propiedades mecánicas, químicas y térmicas que las poliéster, se caracterizan por poseer un alto grado de resiliencia (energía de deformación que puede ser recuperada de un cuerpo deformado cuando cesa el esfuerzo que causa la deformación), buena resistencia a la fatiga y a la contracción durante el secado. Posee viscosidad muy similar a la resina poliéster, lo que facilita la impregnación y manipulación durante el moldeo. Presentan buena adhesión sobre las fibras de refuerzo y buena resistencia al fuego. En la industria naval se utilizan fundamentalmente para la construcción de cascos de embarcaciones o piezas que se encuentran sumergidas constantemente. También se emplea en combinaciones con resinas de poliéster en las primeras capas de laminado para evitar osmosis, y en la fabricación de depósitos, tanques, tuberías y otras piezas que por su finalidad y ubicación requieren alta resistencia química. Aunque se tiene que mencionar que estas son menos utilizadas que las poliéster ya que son más caras.

2.2.3. Resinas epoxi:

Las resinas epoxi son las resinas más utilizadas en los materiales compuestos de alta calidad, básicamente porque poseen mejores propiedades físicas y mecánicas que las resinas de poliéster y de viniléster. Tienen una buena capacidad de adhesión y por lo tanto se obtienen laminados con un elevado contenido de fibra. Las resinas epoxi son resinas termoendurecibles. Se basan en los llamados epóxidos (generalmente bisfenol A), que endurecen por poliadición al reaccionar con los agentes de curado que son normalmente anhídridos disfuncionales o aminas. Por lo tanto, las características finales de la resina dependerán del tipo de epóxido y del agente de reticulación. La dureza de los epoxis es superior a la de las resinas de poliéster y, por ello, pueden operar a temperaturas más altas. La mayoría de las resinas epoxi necesitan la aportación de calor externo para que curen, a través de un proceso de curado o post-curado. [4]

2.2.3.1. Propiedades de la resina epoxi:

- Buena resistencia al ataque de agentes corrosivos.
- Baja contracción durante el curado (0-1%).

- Buenas propiedades eléctricas y térmicas.
- Proporcionan un buen aislamiento eléctrico.
- La viscosidad de las resinas epoxi es muy elevada.
- Buenas propiedades mecánicas hasta 180°C.
- Buena resistencia a los agentes químicos. - Humectación y adherencia óptima.

2.2.3.2. *Proceso de secado de la resina:*

Es el proceso de transformación donde la resina pasa de un estado de líquido a sólido, para que esto suceda se debe de adicionar un catalizador que cumple la función de iniciar el proceso de endurecimiento.

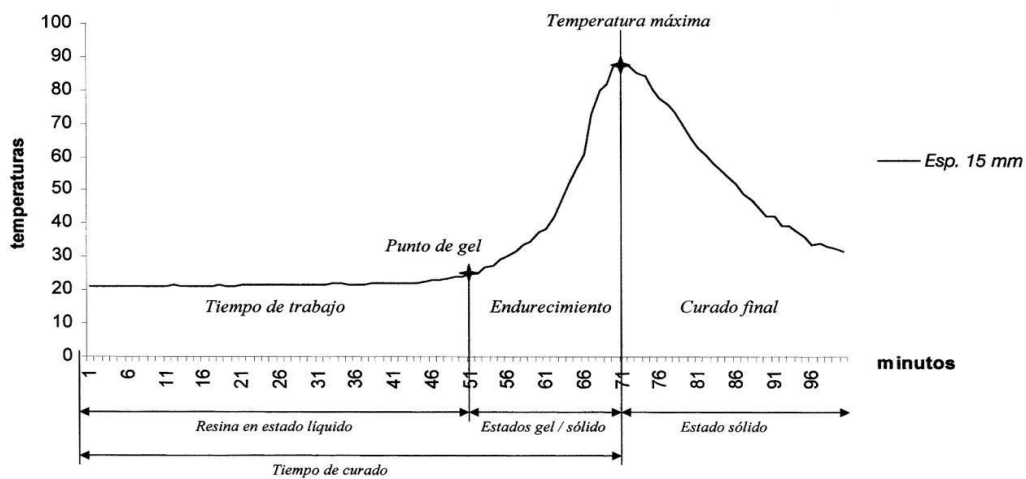


Figura 1. Curva Exotérmica. [4]

Fases durante el proceso de curado:

2.2.3.3. *Tiempo de trabajo:* Es la fase donde se le adiciona el catalizador a la resina y es donde podemos distribuir la resina en el molde durante el proceso de laminado de la pieza, ya que en dicho momento la resina no presenta dificultades para fluir. A medida que el tiempo transcurre la viscosidad de la resina va aumentando, igualmente su temperatura hasta llegar a la fase de convertirse en gel, en dicha fase es imposible seguir impregnando resina en el molde. Esta condición está ligada a los porcentajes de catalizador que se suministre en la mezcla, el espesor de laminado, a la temperatura ambiente y al tipo de resina.

2.2.3.4. Fase de endurecimiento: Sucede después de alcanzar el punto de gel, la mezcla se endurece y desprende calor hasta llegar a una temperatura máxima.

2.2.3.5. Secado final: Luego de alcanzar la temperatura máxima, esta empieza a decaer hasta igualarse con la temperatura ambiente, ya encontrándose la mezcla como un sólido. [5]

Los factores que intervienen durante el secado son:

- Tipo de resina.
- Temperatura del ambiente de trabajo (ideal 17-22° C).
- Naturaleza y cantidad de catalizador y acelerador.
- Espesor del laminado.
- Procesos de secado o postsecado.
- Humedad relativa ambiente.
- Presencia o ausencia de cargas.
- Luz solar.

Para obtener un mejor acabado se puede usar recubrimientos que se aplican en la superficie del laminado y protegen de problemas de medio ambiente, como lo son ataques químicos, agua y humedad; entre los recubrimientos más usados tenemos el gelcoat y tocoat.

2.3. Materiales de refuerzo:

Son las encargadas de resistir las cargas sobre el material y se emplean fibras que pueden ser de carbono, vidrio y kevlar.

En el caso de las fibras de carbono su carácter no es isótropo, sino que sus propiedades están reforzadas en la orientación de la fibra, siendo por tanto muy superiores en las propiedades longitudinales a las transversales. Su grado de perfección depende de que la orientación de los planos de grafito sea en la dirección de la fibra. Su Fabricación y caracterización de laminados de material compuesto a partir de láminas ultra delgadas 7 diámetro oscila entre 7 y 8 μm (frente a los 8-15 μm de las de vidrio). El principal problema de las fibras son sus imperfecciones puesto

que éstas hacen que sus propiedades no sean fijas y puedan variar considerablemente de una fibra a otra, siendo transcendental reducir el número de defectos en los métodos de fabricación y manipulación. [5]

Las mejores propiedades mecánicas de las fibras de carbono se obtienen al asociar las fibras de carbono con matrices del tipo epoxi.

De la fibra de carbono se tienen que destacar:

- Elevada resistencia y rigidez específica.
- Coeficiente de dilatación muy bajo.
- Gran estabilidad dimensional.
- Buena conductividad térmica.
- Buena conductividad eléctrica.
- Buena resistencia a la fatiga.
- Baja resistencia al roce.
- No presenta plasticidad.
- Coste más elevado que la fibra de vidrio.
- Baja resistencia al impacto.
- No se ven afectadas por el contacto con agua de mar.

Las fibras de vidrio se caracterizan por tener un comportamiento isótropo debido a su estructura tridimensional y suelen llevar una capa protectora que evita daños superficiales en las mismas.

Se pueden clasificar en tres tipos: E, C y S. La E se caracteriza por sus buenas propiedades de resistencia, rigidez, desgaste y eléctricas, por ello es el más usado. El C tiene mejor resistencia a la corrosión, mientras que el S en comparación con el E es más rígido y resistente a altas temperaturas, aunque de mayor costo.

Propiedades de la fibra de vidrio:

- Alta adherencia fibra-matriz.
- Excelente resistencia mecánica específica (resistencia a la tracción / densidad).

- Resistentes a la humedad.
- Bajo coeficiente de dilatación.
- Resistentes al ataque de agentes químicos.
- Buen aislante eléctrico.
- Débil conductividad térmica.
- Incombustibles.
- Imputrescibles.
- Bajo coste.

Finalmente, las fibras Kevlar son de tipo orgánico, caracterizadas por su alta resistencia y rigidez teórica fruto de polímeros perfectamente alineados. Al igual que en el carbono, las imperfecciones condicionan sus propiedades y estas son muy superiores en la dirección longitudinal frente a las transversales.

2.4. Tipos de laminados

Los laminados se establecen a partir del apilamiento de láminas, dichas láminas están formadas por una capa de resina de pequeño espesor reforzada con fibras. Existen dos tipos de láminas: de cinta o de tejido, que forman diferentes tipos de laminados. La principal característica de las láminas de cinta es que todas las fibras se encuentran orientadas en una sola dirección y que presentan una isotropía transversal (misma propiedades en direcciones perpendiculares a la fibra). [6]

2.4.1. Los laminados unidireccionales se forman al apilar láminas de cinta, donde las fibras se encuentran orientadas en la misma dirección (Figura 2.)

Laminado unidireccional

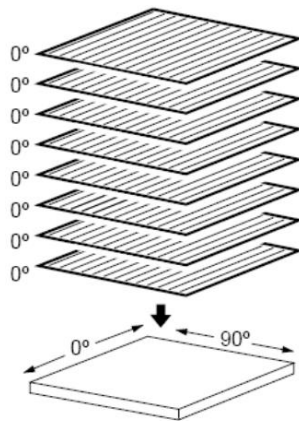


Figura 2. Laminado unidireccional [7]

2.4.2. Los laminados ortótropos (Figura 3): se fabrican a partir del apilamiento de láminas de cinta en dos direcciones ortogonales, cuya principal característica es su comportamiento ortótropo.

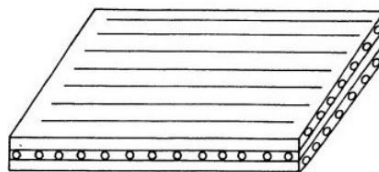


Figura 3. Laminado ortótropo [6]

2.4.3. Los laminados cuasi-isótropos están fabricados a partir del apilamiento de láminas de cinta que encuentran orientadas en diferentes direcciones (0° , 90° y $\pm 45^\circ$). Sus propiedades son aproximadamente las mismas en todas las direcciones, debido a las diferentes orientaciones en cada lámina. En la *Figura 4* se muestra un ejemplo de una configuración cuasi-isótropa que presenta la secuencia de apilamiento $[0^\circ, 90^\circ, \pm 45^\circ]$. [6]

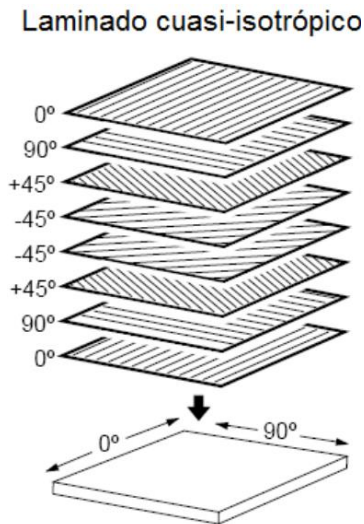


Figura 4. Laminado cuasi-isotrópico [7]

Los laminados de tejido se fabrican a partir del apilamiento de láminas de tipo tejido, las cuales pueden ser de varias configuraciones, pero con un factor en común: la orientación de las fibras se realiza en dos direcciones, perpendiculares entre sí, siguiendo una determinada secuencia de enlazado.

Las fibras longitudinales reciben el nombre de urdimbre¹ y se encuentran entrelazadas por fibras transversales, denominadas tramas. De acuerdo, con el porcentaje de fibras en cada dirección se pueden identificar dos diferentes tipos de láminas de tejido. Si en cada dirección existe el 50 % de fibra se habla de un tejido equilibrado, también llamado tafetán, cuya principal característica es la uniformidad en las propiedades mecánicas en las direcciones 0° y 90°. Esta configuración es la más utilizada. En la *Figura 5* se muestra una lámina de tejido equilibrado o de tipo tafetán. [6]

¹ Conjunto de hilos colocados en paralelo y a lo largo en el telar para pasar por ellos la trama y formar un tejido

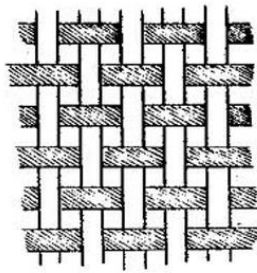


Figura 5. Tejido Tafetán. [8]

2.5. Métodos de Fabricación de Piezas con Materiales Compuestos

2.5.1. Moldeo por contacto

El moldeo por contacto implica la colocación de las fibras de refuerzo y resina líquida sobre la superficie de un molde abierto debidamente acondicionado (pulido y con desmoldante). En esta técnica es importante la habilidad del operario, ya que de él depende que el laminado se realice correctamente. El moldeo por contacto es el método más antiguo, sencillo y económico utilizado en la laminación con materiales compuestos. [1]

De esta técnica podemos destacar:

- Laminado manual
- Proyección simultánea
- Moldeo con impregnadores

2.5.1.1. Laminado manual

El laminado manual es la técnica más antigua conocida en la fabricación de piezas con materiales compuestos. A pesar de ser una técnica sencilla y artesanal, con mucha dependencia de la habilidad del operario, continúa siendo a lo largo de los años la más difundida por su bajo costo como por su adecuación a piezas de diferentes tamaños y formas sin excesivos problemas. En el moldeo de laminado manual las presiones que se ejercen sobre el laminado son muy bajas, ya que es el operario que mediante un rodillo aplica presión para ayudar a la impregnación del refuerzo e intentar que no queden burbujas de aire entre las capas del laminado. Esta baja presión provoca

que las características mecánicas y físicas que se alcanzan sean inferiores a las que se obtienen mediante otros métodos, y esto es debido al bajo porcentaje de fibra del laminado final.

Este método es el más económico debido a su relativa sencillez y que no requiere de mano de obra excesivamente especializada ni inversiones elevadas en cuanto a material de trabajo. Por el contrario, presenta los inconvenientes de un ambiente de trabajo molesto, producción lenta, mayor necesidad de mano de obra, acabado fino solo por una de las caras y la calidad final como ya se ha mencionado anteriormente depende única y exclusivamente de la especialización y sensibilidad del operario. [1]

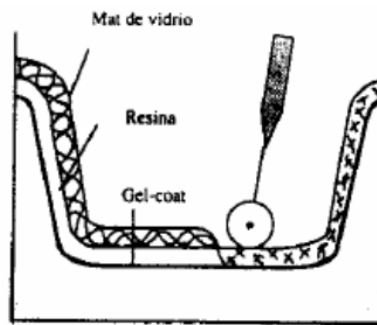


Figura 6. Laminado manual [9]

a) Preparación del molde

En primer lugar, lo que se tiene que hacer es limpiar el molde por si hay algún resto de laminados anteriores. Una vez tenemos la superficie del molde limpia pasaremos a encerarlo. Este encerado proporcionará un acabado superficial del laminado de mayor calidad y actúa como agente desmoldeante.

b) Preparación del refuerzo

Antes de iniciar la fase de laminación es necesario disponer de todo el refuerzo que se va a utilizar cortado según formas y dimensiones aproximadas al desarrollo de la pieza final. Si el laminado consta de varias capas de refuerzo, todas ellas estarán listas para realizar el respectivo

apilamiento, ya que la operación de estratificado² puede y debe hacerse sin necesidad de esperar a la gelificación de las capas anteriores.

c) Aplicación del gelcoat

Cuando se requiere de un acabado superficial óptimo (por necesidades de rugosidad superficial, protección química, color, etc.), será necesario aplicar una primera capa de gelcoat antes de la estratificación de la pieza. La aplicación de gelcoat se realizará de la manera más uniforme posible, con un espesor comprendido entre 0.2 y 0.5 mm. El gelcoat se puede aplicar mediante brocha, rodillo o pistola en función de las dimensiones de la pieza y de la calidad que se quieran obtener.

d) Preparación de la resina

La resina a utilizar para la estratificación, se preparará con los aditivos oportunos, acelerados y catalizados inmediatamente antes de iniciar el moldeo.

e) Realización del estratificado

Para la correcta realización del estratificado es necesario comenzar con una capa de resina sobre el molde, colocando a continuación la primera capa de refuerzo, previamente cortada según la forma y dimensiones aproximadas de la pieza, sin dar lugar a la gelificación de la resina. Una vez tenemos el laminado finalizado se pasará un rodillo metálico, cuya función principal es la de extraer el aire atrapado entre las capas de material.

f) Endurecimiento

Una vez que la pieza ha sido moldeada, es necesario esperar un tiempo variable, entre 45 min y varias horas en función del tipo de resina, condiciones de curado, tamaño de la pieza, rigidez de la misma, etc. antes de proceder al desmoldeo. [1]

g) Desmoldeo

Cuando la pieza ha polimerizado lo suficiente de modo que no se produzcan deformaciones en la misma puede procederse a su desmoldeo. El desmoldeo debe de hacerse usando la técnica adecuada que dependerá fundamentalmente del tamaño de la pieza y su rigidez. Para desmoldar

² Que se presenta en capas o en estratos superpuestos

piezas difíciles con contornos relativamente planos se recomienda el uso de cuñas rígidas, mientras que para piezas con contorno curvado son más adecuadas las cuñas semi-rígidas o flexibles ya que se adaptan mejor a la geometría de la pieza sin producirle ningún daño.

h) Desbarbado y acabado final

El desbarbado consiste en eliminar los excesos de material que aparecen en los bordes del laminado. El laminado manual normalmente va acompañado de un gran exceso de material. Una vez se ha desbarbado la pieza se efectuará el mecanizado definitivo, el cual se lleva a cabo con la pieza totalmente terminada, mediante herramientas adecuadas.

i) Control de calidad

Se realizan ensayos no destructivos a la pieza para ver si cumple con los parámetros establecidos. Las variables de estudio más importantes a tener en cuenta dentro de este control de calidad son las siguientes:

- Aspecto final: calidad superficial, rugosidad, burbujas e imperfecciones.
- Aspectos geométricos: formas, dimensiones y tolerancias.
- Distribución de la fibra y de la resina.
- Ausencia de vacío, aire o inclusiones de impurezas en el laminado.
- Ausencia de zonas despegadas.
- Dureza final adecuada.
- Paredes verticales.

Para acabar con este método, se tiene que hacer mención a las condiciones del ambiente de trabajo, ya que afectan a los tiempos de curado de la pieza. El grado de temperatura más adecuado para el área de trabajo está comprendido entre 15° C y 30° C, siendo el óptimo entre 17° C y 22° C. Otro factor que se tiene que tener en cuenta es la humedad relativa ambiente, ya que la humedad afecta la unión entre los refuerzos secos y la resina, disminuyendo la adhesión en

la interface y por lo tanto esto causa una disminución de la calidad del laminado. Por último una buena limpieza del sector de trabajo evitara que entren partículas de polvo en el laminado que puedan disminuir la calidad de este. [1]

2.5.1.2. Moldeo por proyección simultánea

En esta técnica se proyectan simultáneamente sobre el molde fibras cortada y resina catalizada. El equipamiento para la proyección consta de una máquina para cortar el ancho y largo de la fibra y de una pistola de aire comprimido para proyectar la resina y las fibras cortadas. [10]

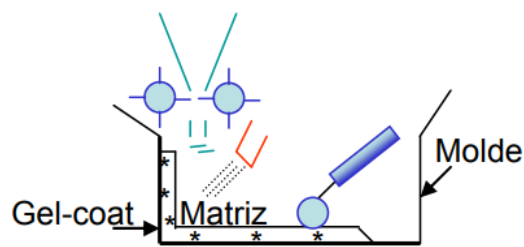


Figura 7. Moldeo por proyección simultánea. [10]

La mezcla de dos componentes se puede llevar a cabo de dos maneras:

- a) con dos boquillas, una que proyecte resina con catalizador y otra con acelerador
- b) con una única boquilla que proyecte la resina acelerada.

Posteriormente, se llevan a cabo las etapas de impregnación de refuerzo por la resina, adaptación del material compuesto al molde, curado de la resina y desmoldeo de la pieza final.

Entre las ventajas de esta técnica destacan:

- El precio del equipo es relativamente barato
- Las tasas de producción son más elevadas que con la técnica manual

Sus principales desventajas son:

- La calidad de la pieza moldeada depende de la habilidad del operario
- Las piezas tienen una sola cara lisa que reproduce la superficie del molde
- Las piezas tienen propiedades mecánicas limitadas debido al uso de fibra corta.

Sus principales desventajas son:

- Poco económico para pequeñas producciones

Tipos de piezas que se pueden obtener por esta técnica: bañeras, depósitos, cascos de barcos y piscinas.

2.5.1.3. Moldeo con impregnadores

El moldeo con impregnadores es una técnica que se ha desarrollado para la construcción de grandes embarcaciones así como en la fabricación de piezas de aviones en materiales compuestos. Esta técnica se encuentra a medio camino entre el laminado manual y los prepeg, ya que el proceso de estratificado es bastante similar al laminado manual, pero con la diferencia de que las fibras ya vienen impregnadas gracias a un equipo de impregnación manual. Con esta técnica obtenemos laminados de mejor calidad, uniformidad y contenido de matriz. [4]

El equipo de impregnación consiste básicamente en sumergir la estructura textil en un baño de resina catalizada y seguidamente eliminar el exceso de resina mediante la compresión del material a través de diversos rodillos de compresión. Gracias a este sistema de compresión, podemos controlar el porcentaje de resina presente en el laminado regulando la separación entre los rodillos.

Una vez realizado el proceso de impregnación se procederá a colocar las fibras impregnadas sobre el molde, para luego realizar el compactado y el desburbujeo, mediante la acción de rodillos o espátulas.

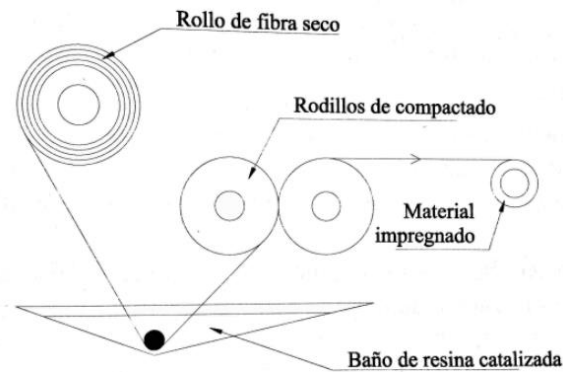


Figura 8. Esquema equipo de impregnación manual. [4]

Algunas de las ventajas que obtenemos con este método son:

- Reducción del tiempo de trabajo.
- Mayor rapidez y facilidad de fabricación de laminados.
- Laminados de mejor calidad, con un mayor control del porcentaje de refuerzo, entre 35 y 55%.

2.5.2. Técnicas de moldeo asistidas por vacío

La técnica de moldeo por vacío consiste en aplicar presión sobre el laminado durante su ciclo de curado. Esto permite conseguir materiales compuestos con mejores propiedades físicas y mecánicas. Al realizarle el vacío al laminado, se consigue remover el aire atrapado entre capas, compactar las capas, evitar cambios de orientación del laminado durante el curado, reducir la humedad y optimizar el contenido de matriz en el material compuesto. [4]

Podemos distinguir tres métodos de producción por vacío:

- Laminado manual asistido por vacío
- Laminado con pre-impregnados
- Laminado con pre-impregnados parciales

Concepto de "vacío":

Se denomina vacío a los estados de presión de aire que se encuentran por debajo de la presión atmosférica. Por lo tanto la diferencia de presión entre el interior y el exterior de la bolsa determina la fuerza de cierre sobre el laminado. [4]

Formas de obtención del vacío:

Existen diferentes formas de obtener el vacío. Cada sistema se distingue por la presión máxima que puede alcanzar. Limitados por sus características constructivas. Entre los sistemas más comunes utilizados en construcción naval podemos distinguir:

Bombas de paletas flexibles:

- Nivel elevado de vacío
- Flujo continuo
- Elevados caudales de aspiración
- Eléctricas

Bombas de anillo líquido:

- Nivel elevado de vacío
- Flujo continuo
- Elevados caudales
- Mínimo desgaste
- Eléctricas

Generadores de vacío:

- Alto caudal
- Bajo niveles de vacío
- Mínimo mantenimiento

- Ruidosos

Accesorios para el laminado por vacío:

La ventosa: Elemento que conecta la manguera con el interior del laminado. Consta de una placa base, una arandela de estanqueidad y una placa de cierre. La placa base presenta anillos concéntricos en relieve, que permiten una mayor estanqueidad con la junta. La ubicación de la ventosa en el molde se debe colocar en una zona donde los posibles fallos queden ocultos.

Las mangueras: Elemento que conecta las ventosas con el equipo de vacío, estas deben poseer un diámetro acorde al volumen de aire que deseamos extraer.

El vacuómetro: Elemento que se utiliza para controlar el nivel de vacío en el interior de la bolsa. Las escalas utilizadas son bares o milímetros de mercurio.

Las trampas de resina o filtros decantadores: son mecanismos que evitan que los excesos de resina que fluyen por las mangueras lleguen al sistema de vacío, previniendo su inutilización. Normalmente se suelen construir de acero.

2.5.2.1. Laminado manual asistido por vacío

Este método es una evolución del laminado manual por contacto, con la diferencia que se aplica presión al laminado durante el proceso de curado mediante un equipo de vacío. Una vez finalizado el laminado manual por contacto, y con suficiente tiempo antes de que comience el proceso de gelificación de la matriz polimérica, se dispone sobre el laminado los materiales fungibles. Estos materiales permitirán realizar el compactado, extraer los excesos de resina, evitar que dichos materiales se queden adheridos a la pieza, facilitarán también el desmoldeo y disminuirán las emisiones de elementos volátiles orgánicos al ambiente. [4]

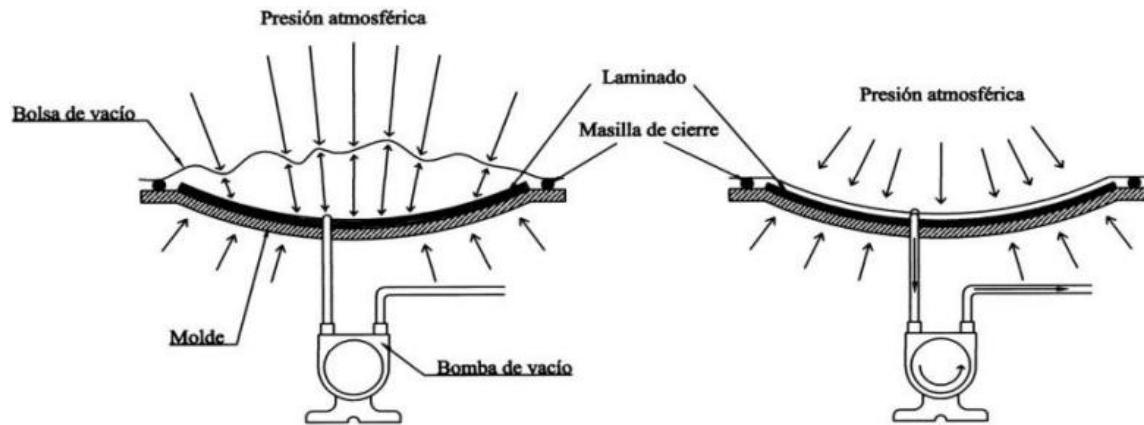


Figura 9. Esquema equipo de impregnación manual asistida por vacío. [1]

Los materiales fungibles son:

Tejidos pelables (peel-plies): Es el primer tejido que se coloca después de la última capa del laminado. Este elemento facilita la extracción de los materiales fungibles del laminado. Poseen un hilo de diferente color para poder identificarlo sobre la pieza una vez curada

Films separadores y films sangradores desmoldeantes: Los films separadores son utilizados para separar el laminado del resto de materiales del proceso de vacío. Los films sangradores son los mismos films separadores pero perforados siguiendo un patrón establecido, que permiten salir al exceso de resina existente en el laminado.

Manta de absorción/aireación: Son tejidos sintéticos no entramados, constituidos de fibras de poliésteres reciclados que permiten circular el aire atrapado por todo el interior de la bolsa hacia algún orificio de salida y actúa como absorbente del exceso de resinas que emana por acción de la presión de compactación.

Film de nylon para bolsa de vacío: Los films de bolsa de vacío son los encargados de sellar todo el laminado, incluido el resto de fungibles anteriormente mencionados. Una vez sellados se realiza el vacío en el interior de la membrana creada sobre el laminado.

Masillas de cierre (tacky-tape): Se utilizan para sellar el molde y la bolsa de vacío.

2.5.3. Moldeo con autoclave

En esta técnica se utiliza una autoclave, que es un recipiente que permite el calentamiento y la aplicación de presión y vacío. Sobre un molde se colocan capas de semielaborado y se recubre

con una membrana ligera. El conjunto se introduce en una autoclave, se aplica vacío para eliminar el disolvente y se eleva la temperatura para que tenga lugar la polimerización. [4]

La autoclave consta de los siguientes elementos:

- Una cámara presurizada
- Dispositivos de calentamiento.

Para obtener uniformidad de temperatura se utiliza un ventilador.

- Sistema de presurización del gas y de aplicación de vacío
- Sistema de control de los parámetros del curado

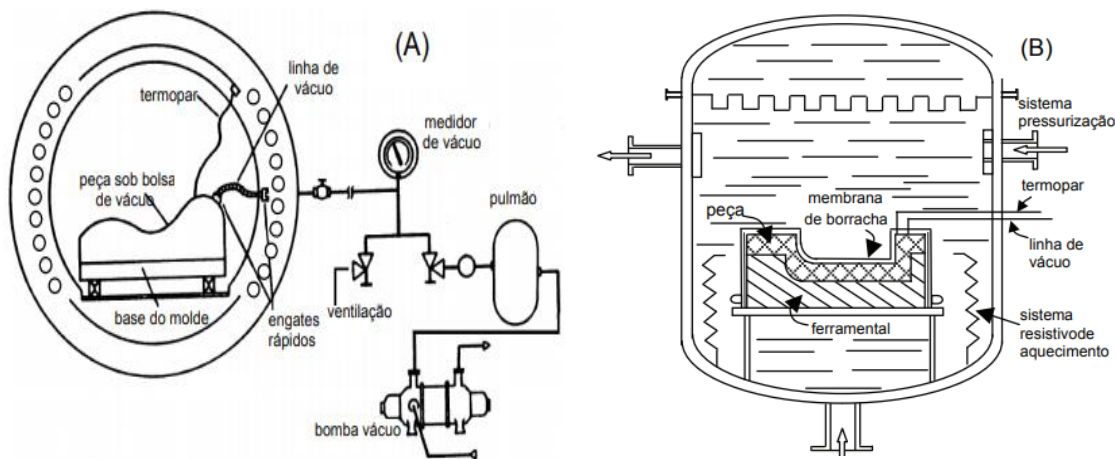


Figura 10. Esquema sistema de moldeo con autoclave. [11]

Durante el proceso de transformación del material se deben controlar las siguientes condiciones:

- La correcta consolidación de los laminados
- La porosidad del material
- La exotermicidad de la reacción de curado logrando que la resina cure completamente en todas las partes de las láminas
- El tiempo total del proceso mediante la automatización del mismo.

Entre las ventajas de esta técnica destacan:

- Se consigue un producto uniforme en espesor, apariencia y propiedades
- Permite la fabricación de piezas con formas complejas
- El material obtenido tiene buenas propiedades mecánicas

Sus principales desventajas son:

- Alto precio del equipamiento y de los semielaborados
- Limitaciones en el tamaño de la pieza
- Ciclos muy largos (colocación de semielaborados + autoclavado)

Tipos de piezas que se pueden obtener por esta técnica:

Elementos de la estructura de aviones, helicópteros: rotores, puertas, etc... Es el sistema habitualmente empleado por las industrias aeronáuticas y espaciales porque se permite obtener piezas de la más alta calidad.

Capítulo 3

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PROBETAS

3.1. Antecedentes

En el artículo “Análisis comparativo de las propiedades mecánicas de un material compuesto reforzado con fibras de carbono y las de su matriz polimérica de resina epóxica” [12], Para la caracterización de material compuesto, se llevó a cabo el corte de 6 capas de fibra de carbono 3K de espesor nominal de 0.30 mm, con una orientación $[0/\pm 45]$ s, el cual es un laminado simétrico balanceado cuasi-isotrópico. La fibra se impregno de su matriz termoestable con 150 gr resina epóxica y 15 gr de catalizador, utilizando el arreglo de mezclas 10:1, se aplicó el método de manufactura por vacío. [12] El tiempo de curado del material compuesto fue alrededor de 72 horas a temperatura ambiente, y se utilizó el método de laminación por vacío. Posteriormente bajo las especificaciones de la norma ASTM D3039 [13], finalmente se fabricaron 5 probetas de material compuesto.

Para los ensayos de tensión se utilizó la maquina universal de ensayos SHIMADZU, cuenta con una celda de carga de 100 KN, la velocidad empleada para los especímenes fue de 2 mm/min, la cual es especificada en la norma D3039. [12] Realizándose una comparación de los esfuerzos máximos soportado con cada probeta. En donde resalta que existió una correlación tanto en esfuerzo como en deformación, pero una de las probetas presento una mayor magnitud de esfuerzo máximo. [12] concluyendo que en la gráfica de la curva esfuerzo-deformación sobre la resistencia a la tensión en las muestras de material compuesto, los esfuerzos máximos soportados son aquellas que tienen orientación de la fibra de carbono $[0/\pm 45]$ s, en el material compuesto, dado que actúa efectivamente como el material de refuerzo de la resina epóxica. [12]

3.2. Esquema de configuración de probetas

Para el diseño de las probetas se tomó como parámetro esencial la variación de cantidad de capas en cada probeta, así como la disposición de las fibras en diferentes direcciones. Como muestra las figuras 11 y 12 las disposiciones tienen la particularidad de que divergen en su composición debido al inicio de la primera capa de fibra. En la figura 11 se observa que la primera capa inicia

con el direccionamiento de las fibras en 0 y 90° ³ seguida por una capa con direccionamiento de fibras de $(+45^\circ$ y $-45^\circ)$ ⁴; mientras que en la figura 12 se inicia con una capa que contiene fibras direccionadas a $(+45^\circ$ y $-45^\circ)$ y es seguida por una capa con orientación $(0$ y $90^\circ)$.

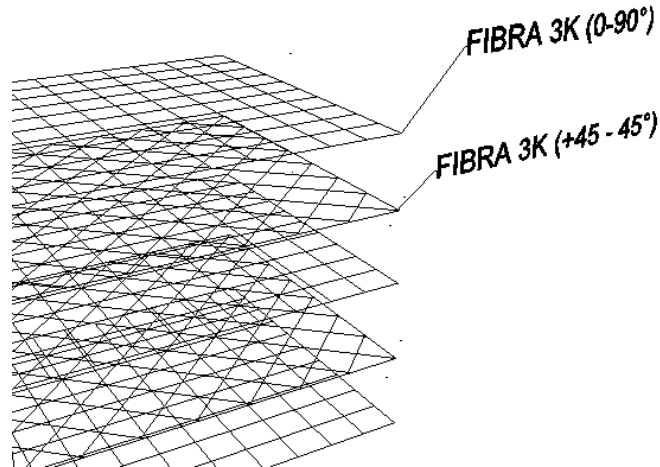


Figura 11. Apilamiento de fibras con configuración $(0-90)$ y $(-45+45^\circ)$

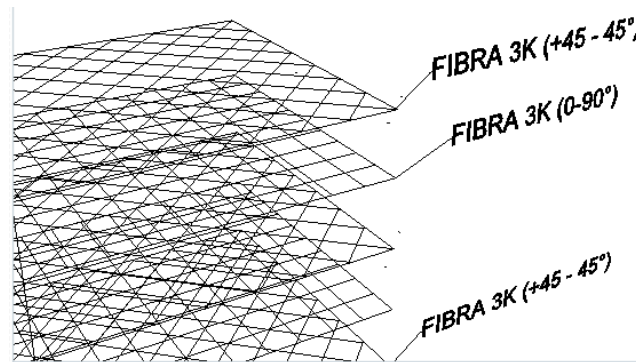


Figura 12. Apilamiento de fibras con configuración $(0-90^\circ)$ y $(-45^\circ+45^\circ)$

Así de esta manera, se diseñaron tres clases diferentes de configuración de probetas teniendo en cuenta las variables: orientación y cantidad de capas antes mencionadas.

³ Esta disposición viene dada por el tejido a 90° que presenta el tipo de fibra utilizado para realizar las pruebas.

⁴ Se forman al realizar el corte a una inclinación de 45° en la fibra que por defecto tiene fibras de 0 y 90° .

Según lo anterior el orden cronológico de la disposición de las fibras para las probetas a fabricar son las siguientes:

a) Se diseñan 2 probetas las cuales tendrán una configuración de 3 y 5 capas con el aliciente de iniciar en su primera capa con orientación de $(+45^\circ$ y $-45^\circ)$ y ser precedida por una capa de $(0^\circ$ y $90^\circ)$ sucesivamente hasta alcanzar la cantidad de capas deseado.

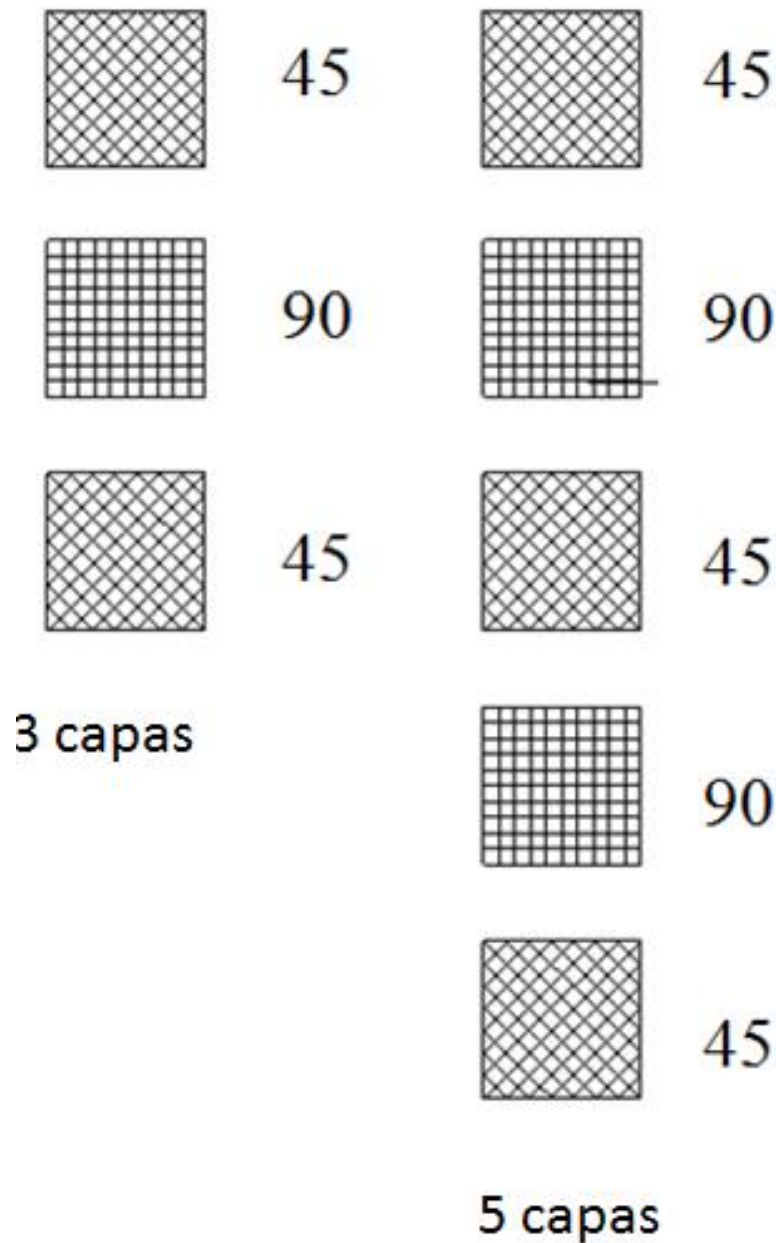


Figura 13. Diseño de configuración de probetas iniciando con fibras orientadas a $+45^\circ$ y -45° con fibra 3K

b) Teniendo en cuenta el mismo criterio de elaboración de las anteriores probetas se elaboran 3 piezas de 3,4 y 5 capas respectivamente , pero en este caso se inicia con la primera capa con fibras dispuestas a (0 y 90°) precedida por una capa de ($+45^\circ$ y -45°) hasta alcanzar el número de capas necesario.

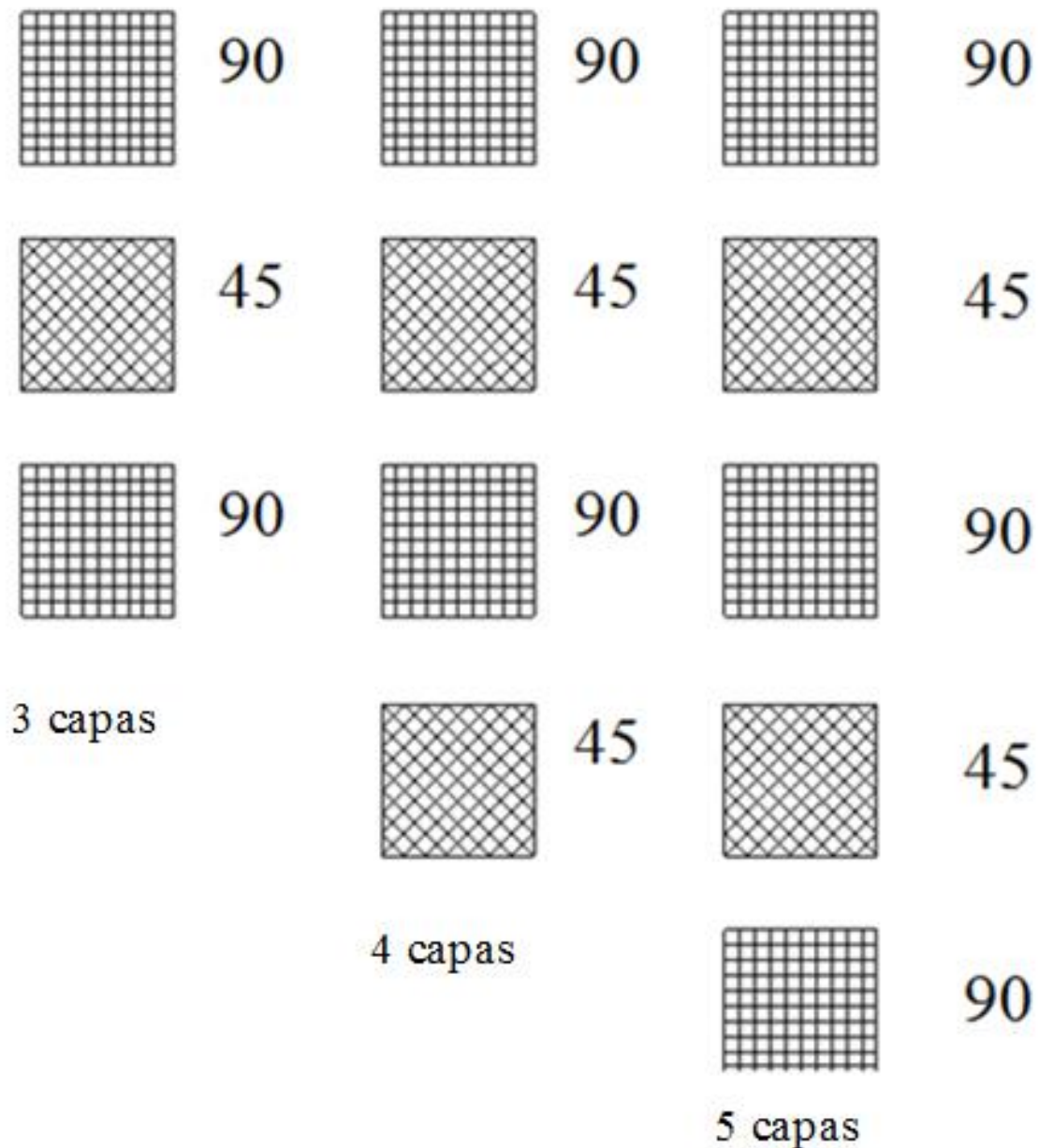


Figura 14. Diseño de configuración de probetas iniciando con fibras orientadas a 0° y 90° con fibra 3K

Por último se construirán 3 probetas de 3, 4 y 5 capas, pero esta vez se utilizaran todas las fibras con orientación de fibras de (0 y 90°) y el tipo de fibra utilizado será 6K.

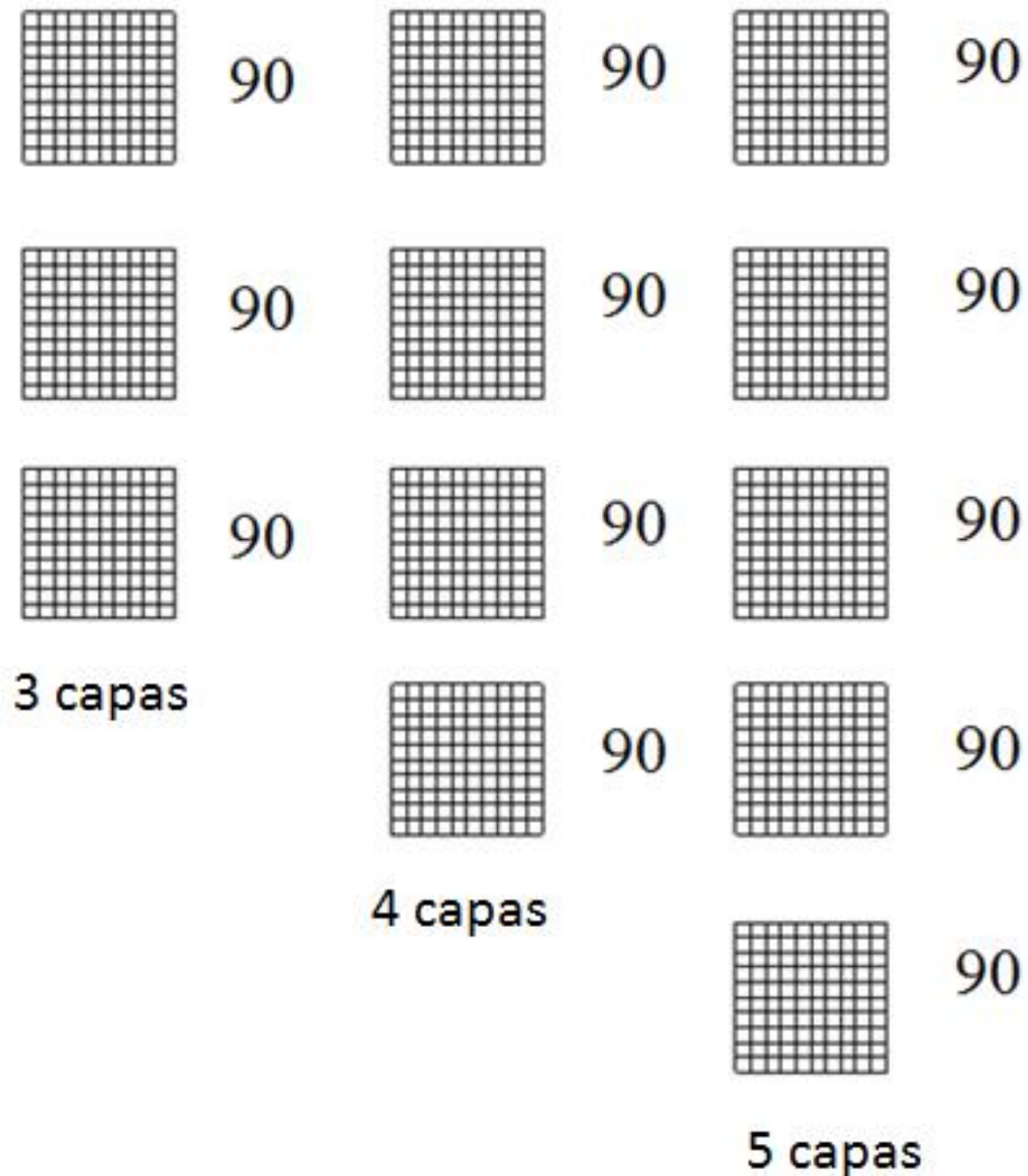


Figura 15. Diseño de configuración de probetas utilizando solo fibras orientadas 0 y 90° con fibra 6K

Adicionalmente en la primera etapa de laminado del compuesto, se decidió elaborar una probeta con un núcleo, la cual será sometida a pruebas de flexión, esto con la finalidad de encontrar un punto de acercamiento a las propiedades obtenidas en un tubo de acero 4140.

Como se observa en la figura 13, el diseño de dicha probeta es un apilamiento tipo sándwich con capas de fibra de carbono adheridas en ambas caras del núcleo, utilizando entre ellas una capa de fibra de vidrio la cual garantiza una mejor adherencia del núcleo con la fibra de carbono.

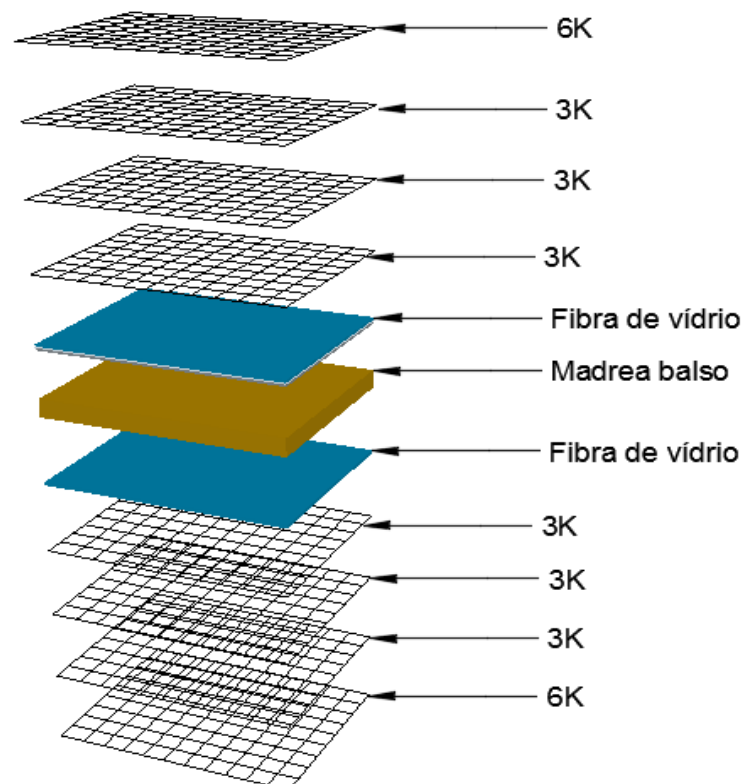


Figura 16. Apilamiento en forma de sándwich para probetas sometidas a pruebas de flexión.

3.3. Proceso de elaboración de probetas

A continuación se muestra una descripción detallada del proceso de laminación utilizado en este proyecto (laminación manual asistida por vacío).

3.3.1. Materiales a utilizar:

- Manta absorbente. Anexo 3.
- Bolsa de vacío. Anexo 5.
- Desmoldante (alcohol polivinílico). Anexo 4.
- Desmoldante (cera sumiglas).
- Resina epóxica (Quad Carbon sistema epoxi plus-L, parte A y B). Anexo 1
- Plástico desmoldante perforado. Anexo 6.
- Cinta de vacío (taki pei). Anexo 7.
- Limpiador – desengrasante (frecote pmc). Anexo 2
- Madera balso (dimensiones 12x150x915mm).
- Vidrio (dimensiones 1m x 1m).
- Fibra de carbono (bidireccional 3k, 6k). Anexo 10.
- Brochas.
- Esponjas.
- Guantes.
- Bomba de vacío. Anexo 9.
- Manguera.
- Secador
- Fibra de vidrio. Anexo 8.

3.3.2. Preparación del área de trabajo:

Se utiliza un vidrio como base y sobre él se realizará el proceso de laminación, luego se procede a limpiar el vidrio con frecote pmc (desengrasante) para evitar la presencia de partículas extrañas en la probeta y se delimita un área de trabajo con cinta de papel (dimensiones aproximadas 1m x 1m).



Figura 17. Limpieza de vidrio. [Autores]



Figura 18. Delimitación del área de trabajo. [Autores]

Aplicación del desmoldante:

Se aplica 6 capas de alcohol polivinílico. Entre capa y capa se esperó un tiempo aproximado de 15 min para el secado, usando un secador para agilizar el proceso.



Figura 19. Secado del alcohol polivinílico por medio de pistola de calor. [Autores]

3.3.3. Adecuación de elementos de trabajo y fibra de carbono

Antes de llevar a cabo el proceso de laminación es necesario tener una previa organización de los elementos con las medidas y disposiciones estipuladas durante el diseño.

Acondicionamiento dimensional del núcleo

Se procede a cortar la tabla, para obtener 2 piezas de 45cm x 27,5cm x 1,5cm de dimensión, estas piezas componen el alma de la probeta. Se realiza perforaciones de 1/8 de diámetro, a distancias de 5cm x 6cm con el fin de que la resina en exceso cruce hacia la manta de absorción⁵ y así se garantiza una mejor compactación, es recomendable hacer perforaciones a una distancia considerable y con diámetros pequeños para que no afecte la resistencia de la tabla.

⁵ Hace referencia al exceso de resina presente en la parte inferior del núcleo el cual es conducido mediante presión de vacío hacia la manta absorbente ubicada en la parte superior del laminado.



Figura 20. Tabla perforada. [Autores]

Adecuación dimensional del plástico desmoldante y manta de absorción:

Se recorta el plástico desmoldante y la manta de absorción, acorde con las dimensiones del área de trabajo. (1m x 1m).

Manta de absorción:

La manta de absorción es la encargada de captar los excesos de resina presentes en el laminado, por lo tanto, esta se debe ubicar al final de todo el proceso de apilamiento.



Figura 21. Manta de absorción. [Autores]

Plástico desmoldante:

En el proceso de laminado, es el encargado de evitar que la manta de absorción se adhiera a la fibra de carbono. Este plástico se caracteriza por tener una cierta porosidad que permite el flujo de resina excedente hacia la manta de absorción. Para el procedimiento a realizar se corta con dimensiones idénticas a la manta absorbente.



Figura 22. Plástico desmoldante. [Autores]

Plástico de vacío:

Se encarga de ejercer presión sobre la superficie laminada, debido al vacío generado por la bomba que se conecta a este elemento.

Se recorta el plástico de vacío con dimensiones de 1,05cm x 1,05cm.



Figura 23. Plástico de vacío. [Autores]

Acondicionamiento de la fibra de carbono:

Se recortó la fibra de carbono (3k y 6k) utilizando una tijera de costura (se recomienda utilizar este tipo de tijera debido a que la fibra tiende a dañar el filo debido a la dureza de las fibras), obteniendo 6 láminas de 3k y dos láminas de 6k con dimensiones de 28cm x 46cm al igual que dos fibras de vidrio (para fabricar la probeta que se someterá a flexión).



Figura 24. Corte de fibra de carbono. [Autores]

Se utilizaron retazos para fabricar las probetas que serán sometidas a tracción (fibra 6k) teniendo en cuenta que estas probetas según la norma ASTM D3039 deben tener 25mm x 250mm (en esta ocasión se fabricaron las piezas con la disposición diseñada en la figura 15).



Figura 25.laminas cortadas para probetas de tracción. [Autores]

Se retira la cinta que se utilizó para delimitar el área de trabajo, después de que las capas de desmoldantes estén listas y posteriormente se delimita la misma área, pero con cinta de vacío (taki-pei⁶).

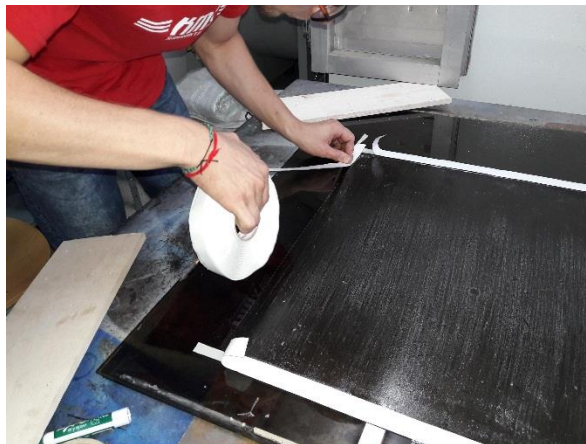


Figura 26. Pegado de cinta taki pei. [Autores]

3.3.4. Proceso de laminación manual asistida por vacío.

Se precede a mezclar los componentes de la resina epóxica (resina + catalizador) en proporciones de 100 partes por 10 partes respectivamente, en total se utilizaron aproximadamente 660gr de resina y 66gr de catalizador para realizar el laminado.

Impregnación de la resina epóxica:

Aplicar la primera capa de resina de manera generosa sobre el vidrio y acomodar la primera lamina de fibra de carbono, en este caso se pone una de 6k y se entrapa bien la superficie con una brocha, con el fin de que haya un buen impregnado de las fibras a laminar y obtener un buen acabado, de igual manera para el resto de las capas respetando la configuración de las probetas que se encuentran en la figura 16.

⁶ Cinta utilizada para garantizar que no exista ingreso de aire en el área de trabajo, actuando como unión entre el vidrio y el plástico de vacío.

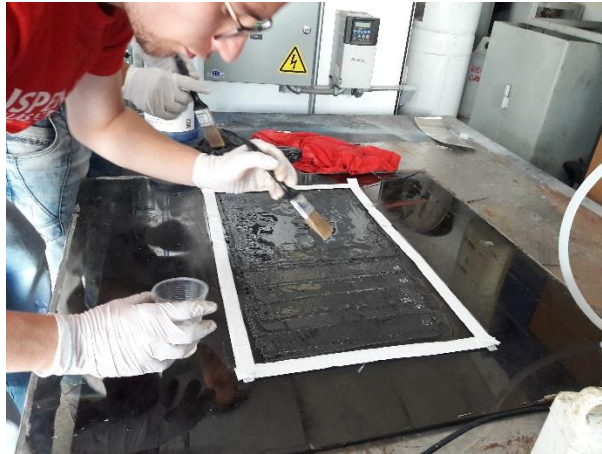


Figura 27. Aplicación de resina sobre la fibra de carbono. [Autores]

Uso del plástico desmoldante y bolsa de vacío:

Una vez realizada la disposición de las fibras, se pone sobre la superficie de trabajo el plástico desmoldante, esto para evitar que se pegue la fibra de carbono a la manta de absorción. De igual manera la manta se pondrá sobre el plástico desmoldante, para que absorba los excesos de resina en las probetas y así garantizar un mayor porcentaje de fibra de carbono con relación a la cantidad de resina, así como también, garantizar la ausencia de burbujas de aire en la superficie ya que esto permite obtener piezas con mejores propiedades y un mejor acabado.

Posteriormente se pone el plástico de vacío, dicho elemento se asegura en los bordes con la cinta taki pei o cinta de vacío, en el momento que se active la bomba de vacío.

Finalmente se realiza un agujero en el plástico con el objetivo de insertar una manguera o tubo de vacío. Este tubo se debe de instalar con precaución de que no queden fugas de aire en su contorno; para esto se asegura tapándolo con la cinta taki pei.

Se procede a encender la bomba de vacío⁷ y se deja trabajar por 2 o 3 horas aproximadamente hasta que la resina se endurezca (en nuestro caso se usó como referencia un poco de resina en un vaso).

⁷ Se utilizó una bomba de vacío marca ROBINAIR, (8CFM, Pmax=15 Psi, V= 120-60Hz, Pot= 1HP)

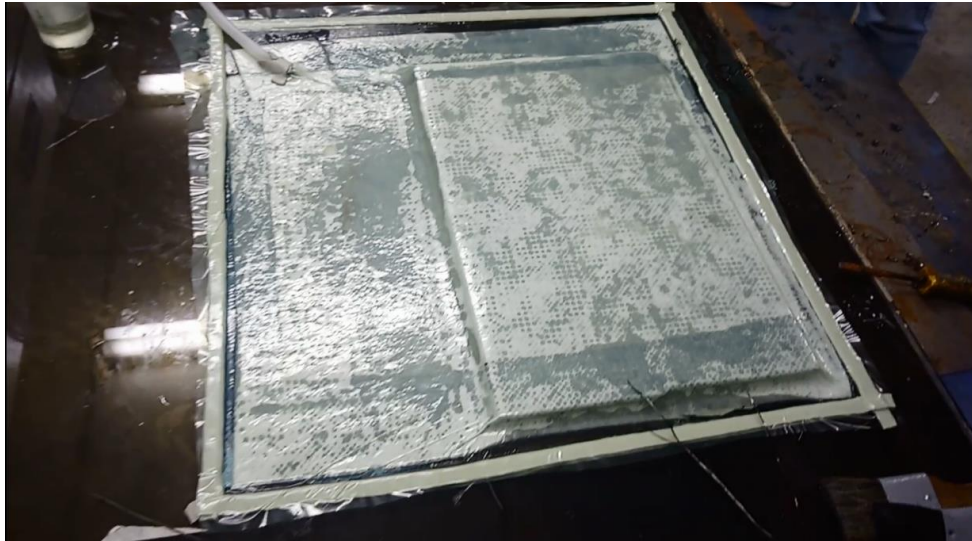


Figura 28. Aplicación de vacío sobre la superficie laminada. [Autores]

3.3.5. Desmoldeo:

Las piezas se dejaron en etapa de curado por 48 horas y luego se procedió a despegar las probetas del vidrio. Cabe resaltar que el desmoldante usado (alcohol polivinílico), generó inconvenientes en el desmoldeo, ya que resultó un tanto tedioso despegar las piezas de la base de vidrio y el acabado de las piezas no fue totalmente uniforme.



Figura 29. Desmoldeo de la fibra de carbono. [Autores]

3.3.10. Corte de probetas

Para cortar las probetas se utilizó una pulidora y un disco de corte de metal de 2mm de grosor. Esto se utilizó debido a que no se tenía un dispositivo de corte adecuado a disposición. El inconveniente con este método es la precisión de corte, aunque las probetas obtenidas, si respetan las dimensiones deseadas. Posteriormente se recortan láminas de aluminio de 2mmx 50mm, luego se adhieren a los extremos de las probetas, utilizando un pegante anaeróbico, esto con el fin de que sirvan como apoyos de sujeción para las mordazas de la máquina de tracción.



Figura 30. Probetas de fibra de carbono. [Autores]

3.3.11. Producción de nuevas probetas

Para este caso se procede a trazar el área de trabajo, a recortar las fibras de carbono de acuerdo a la disposición que se encuentran en las figuras 13-14 y a limpiar adecuadamente el vidrio como se describe en el procedimiento anterior, se aplica un nuevo producto desmoldante (cera sumiglas). La cera se adiciona usando una esponja de lavar platos y se aplica en forma de círculos, luego se deja secar y se brilla, esto se debe de hacer con un trapo de superficie suave y aplicando 12 capas tomando intervalos de 10 min de secado, y utilizando una pistola de calor. Después de aplicar el desmoldante se procede a repetir el proceso de laminación de fibra de carbono expuesto anteriormente.

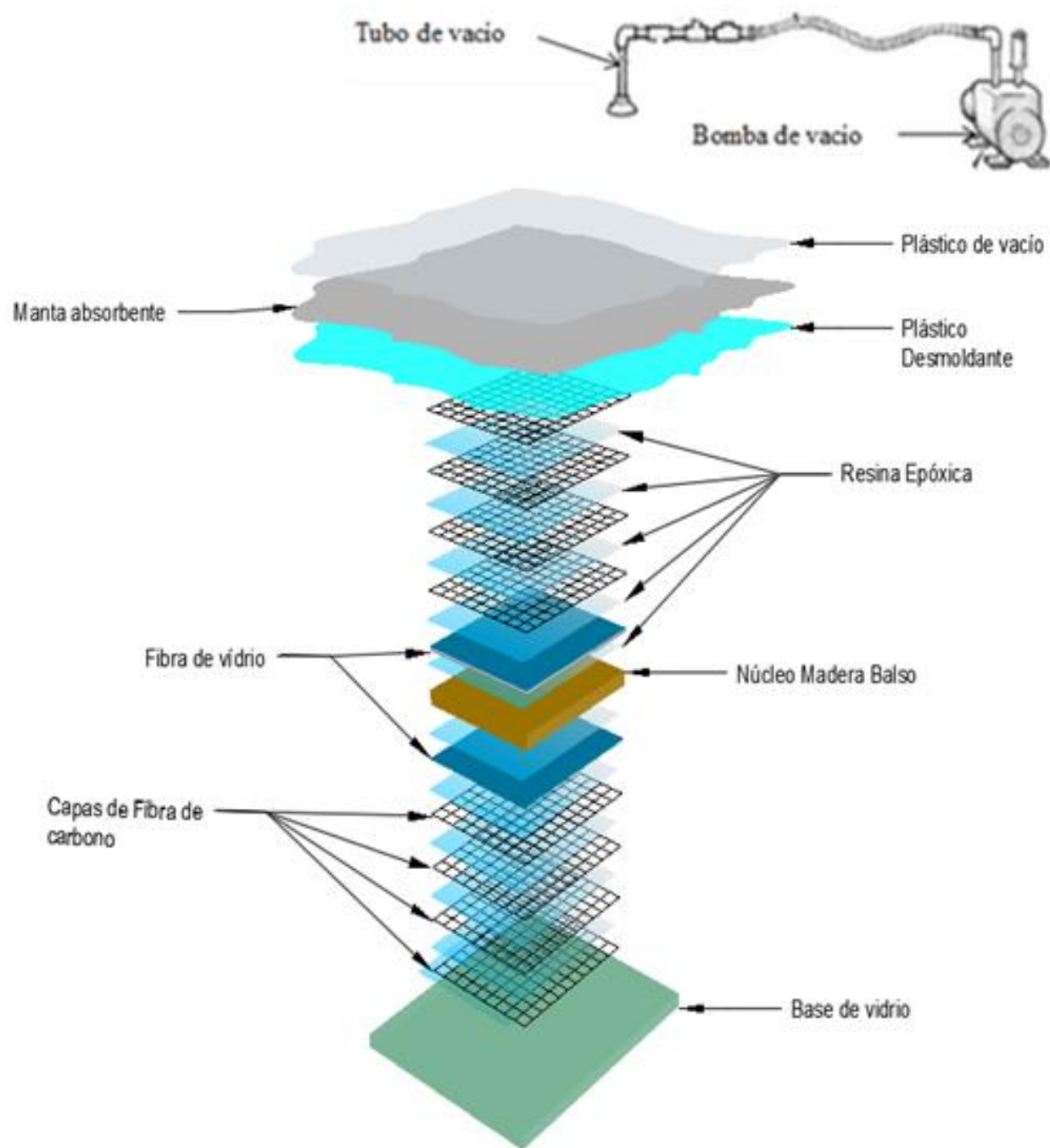


Figura 31. Esquema del proceso de fabricación. [Autores]

Capítulo 4

4. PRUEBAS DE RESISTENCIA PARA EVALUACION DE PROPIEDADES MECÁNICAS

4.1. Prueba de tracción

Para realizar la prueba de tracción a las probetas fabricadas se utilizó una Máquina Universal de ensayos: ZD 40 WPM Leipzig, Celda de carga Omega LC41275K-DUAL con una Fuerza máxima aplicable de 38000 kgf. Figura 32.



Figura 32. Máquina Universal de ensayos: ZD 40 WPM Leipzig

La velocidad empleada para la prueba fue de 2 mm/min y La distancia de área libre de la probeta es de 150 mm, según especificaciones de la norma ASTM D3039. Esta máquina fue modificada con la finalidad de almacenar los datos obtenidos dentro de un programa⁸, que me permite realizar gráficas y análisis de estas sin tener la necesidad de realizarlo de forma manual.

Antes de realizar esta prueba fue necesario medir el espesor y ancho de las probetas con el fin de ingresarlo al programa de la máquina. De esta manera se obtiene el área y a su vez junto al dato

⁸ El programa utilizado por la maquina es MATLAB

de fuerza resistida entregada por la máquina, el programa me proporciona los datos de *esfuerzo vs deformación* soportado por las probetas durante la prueba.

4.2. Prueba de flexión

Para realizar la prueba de flexión se utilizó la máquina de ensayo: IBERTEST UMIB-600-S con una fuerza máxima 600 kN, y una velocidad promedio de 2,5 mm/s. Se usaron dos tubos de acero 4140 de diámetro 30 mm x 275 mm de largo, estos se usaron como apoyos y la distancia mínima entre ellos debía de ser de 400mm. Para aplicar la carga se usó un tubo de acero 4140 con un diámetro de 100mm x 500mm de largo como lo especificaba las reglas de la formula SAE 2019. [14]

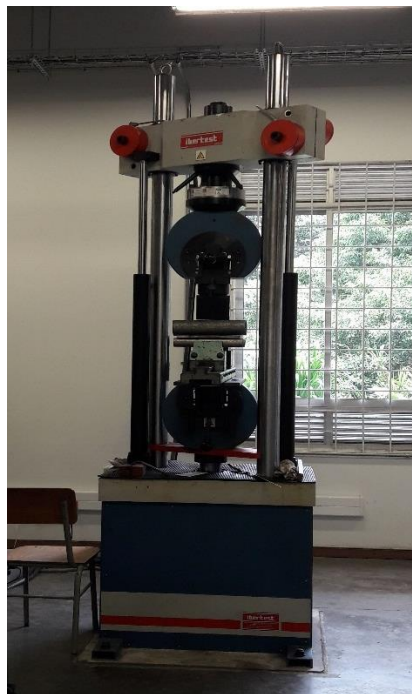


Figura 33. Máquina de ensayos IBERTEST UMIB-600-S.

Antes de iniciar con la prueba era necesario ingresar datos como el área y el espesor de la probeta, con la finalidad de que el software (buscarlo) que analiza los datos pueda calcular el esfuerzo máximo en las probetas, para esto primero se sometió a flexión un tubo de acero 4140 con diámetro de 25mm y 500mm de largo, luego se aplicó las mismas condiciones para una

probeta de fibra de carbono con un núcleo de madera balsa con medidas de 440mm de largo, 270mm de ancho y un espesor de 13mm.

A continuación, se muestra una matriz con el tipo de ensayo a realizar según la probeta y algunas especificaciones técnicas que son importantes para llevar a cabo la respectiva prueba:

NUMERO DE PROBETA	CÓDIGO	NÚMERO DE CAPAS	TIPO DE DISEÑO	TIPO DE FIBRA	TIPO DE ENSAYO	Dimensiones		
						ANCHO(mm)	ESPESOR(mm)	LONGITUD LIBRE (mm)
1	3_capas_90°_6k	3	Figura 15	6K	Tracción	22,56	0,75	150
2	4_capas_90°_6k	4	Figura 15	6K	Tracción	23,39	0,97	150
3	5_capas_90°_6k	5	Figura 15	6K	Tracción	24,28	1,15	150
4	3_capas_45-90°	3	Figura 13	3K	Tracción	22,91	0,73	150
5	5_capas_45-90°	5	Figura 13	3K	Tracción	25,77	1,14	150
6	3_capas_90-45°	3	Figura 14	3K	Tracción	22,5	0,64	150
7	4_capas_90-45°	4	Figura 14	3K	Tracción	23,05	0,94	150
8	5_capas_90-45°	5	Figura 14	3K	Tracción	24,3	1,14	150
9	flexión	6	Figura 16	2 de 6K y 6 de 3K	Flexión	273	13	150

Tabla 1. Matriz de pruebas según el tipo de probeta. [Autores]

Capítulo 5

5. RESULTADOS OBTENIDOS

5.1. Probetas obtenidas

Como resultado del proceso de laminación se obtuvieron 8 probetas para la prueba de tracción, 3 con diseño de orientación de fibras estipulado en la figura 15 y las 5 restantes obtenidas en el segundo laminado con configuración de orientación de fibras estipulado en las figuras 13 y 14.

5.1.1. Probetas apenas laminadas.

Después del proceso de laminación, a las probetas obtenidas como producto final se les realizaron las respectivas mediciones con un Pie de Rey, con una precisión de 0,01mm, dichas probetas tuvieron las siguientes características dimensionales.

TIPO DE PROBETA	ANCHO(mm)	ESPESOR(mm)	LONGITUD TOTAL (mm)
3_capas_(0-90°)_6k	22,56	0,75	250
4_capas(0-90°)_6k	23,39	0,97	250
5_capas_(0-90°)_6k	24,28	1,15	250
3_capas_45-90°_3K	22,91	0,73	250
5_capas_45-90°_3K	25,77	1,14	250
3_capas_90-45°_3K	22,5	0,64	250
4_capas_90-45°_3K	23,05	0,94	250
5_capas_90-45°_3K	24,3	1,14	250

Tabla 2. Dimensiones de las probetas de fibra de carbono. [Autores]

En esta tabla se encuentran denotadas cada probeta de acuerdo con la cantidad de capas apiladas durante el proceso de laminación, así como también el tipo de orientación de las fibras, por ejemplo:

- **3_capas_90°_6k:** es una probeta que tiene en su composición 3 capas de fibra de carbono, con orientación de fibras de (0-90°) y el tipo de fibra utilizada es 6K.

- **3_capas_45-90°_3K:** es una probeta que tiene en su composición 3 capas de fibra de carbono, con orientación de fibras de $(-45^\circ/+45^\circ)(0/90^\circ)$. La denotación “45-90°” hace referencia a el orden de apilamiento de las capas de fibra de carbono, en este caso se especifica que inicia con una capa de 45° y la precede una capa de 90° y de esta manera se alternó el orden de apilamiento de las láminas de fibra de carbono hasta alcanzar la cantidad de capas deseado. Para estas probetas se utilizó una fibra de carbono tipo 3K.
- **3_capas_90-45°_3K:** es una probeta que tiene en su composición 3 capas de fibra de carbono, con orientación de fibras de $(-45^\circ/+45^\circ)(0/90^\circ)$. La denotación “90-45°”, así como se especificó en el caso anterior, hace referencia al orden de apilamiento de las capas de fibra de carbono inicia con una capa de 90° y la precede una capa de 45° y de esta manera se alternó el orden de apilamiento de las láminas de fibra de carbono hasta alcanzar la cantidad de capas deseado. Para estas probetas se utilizó una fibra de carbono tipo 3K.

Así como se mencionó en el capítulo 3, en el primer proceso de laminación se obtiene una probeta tipo sándwich para la prueba de flexión como se muestra en la figura 35.



Figura 34. Probeta de fibra de carbono con nucleo de madera balso. [autores]



Figura 35. Prueba de flexión para probeta de fibra de carbono con núcleo de madera balso. [Autores].

Así como también se obtuvieron las 3 probetas para tracción con la configuración (0-90°) (figura 15), lo cual se muestran en la figura 37G.



Figura 36. Probetas obtenidas en primer laminado con disposición (0-90°) fibra 6K. [autores]



Figura 37. Probeta de fibra de carbono sometida a prueba de tracción. [Autores]

Y finalmente en el segundo procedimiento de laminación se obtuvieron las 5 probetas restantes para el ensayo de tracción Figura 39.



Figura 38. Gráfica de Esfuerzo vs número de capas con orientación de fibras 90-45°. [Autores]

5.1.2. Después de hacer pruebas de tracción

Luego de realizar las pruebas correspondientes de tracción y flexión, las probetas experimentaron diferentes tipos de rotura, teniendo repercusión directa en los resultados, el tipo de acabado final de las probetas, el tipo de disposición de apilamiento de las fibras, entre otros aspectos que para

efectos prácticos no serán parte de estudio en esta tesis; pero si es importante mostrar el resultado del aspecto final de las probetas para efectos de discusión en el análisis y recomendaciones que posteriormente se llevara a cabo en este documento.

En este orden de ideas, las probetas obtenidas después de las pruebas de tracción y flexión fueron las siguientes:



Figura 39. Destrucción de probeta de fibra de carbono con madera balsa al someterla a prueba de flexión. [Autores].



Figura 40. Probeta fisurada después de prueba de flexión.[Autores]



Figura 41. Probetas fracturadas después de prueba de tracción.[Autores]



Figura 42. Destrucción de probetas de fibra de carbono por método de tracción. [Autores]

5.2. *Graficas obtenidas.*

Luego de realizar las pruebas de tracción se obtuvieron datos de fuerza, esfuerzo y deformación, con lo cual se elaboraron las siguientes gráficas.

5.2.1. *Gráfica de esfuerzo vs número de capas.*

De acuerdo con los datos obtenidos, en las pruebas se crearon 3 gráficos en los cuales se muestra una comparación de los esfuerzos máximos soportados por cada probeta tomando como variable la cantidad de fibras apiladas en cada una de ellas.

Para este tipo de gráficas, es importante aclarar el significado de algunas denotaciones:

- **90-45°**: hace referencia a él orden de apilamiento de las capas de fibra de carbono, inicia con una capa de 90° y la precede una capa de 45° y de esta manera se alternó el orden de apilamiento de las láminas de fibra de carbono hasta alcanzar la cantidad de capas deseado. Para etas probetas se utilizó una fibra de carbono tipo 3K. (*diseño de Figura 14*).
- **45-90°**: en este tipo de disposición se especifica que el orden de apilamiento de capas, inicia con una capa de 45° y la precede una capa de 90° y de esta manera se alternó el orden de apilamiento de las láminas de fibra de carbono hasta alcanzar la cantidad de capas deseado. Para etas probetas se utilizó una fibra de carbono tipo 3K. (*diseño de Figura 13*).
- **6K**: se refiere a las probetas que en su composición está elaborada con fibra de carbono 6K y el orden de apilamiento es de (0-90°) en todas sus capas. (*diseño de Figura 15*)

GRAFICA ESFUERZO VS NÚMERO DE CAPAS 90-45°

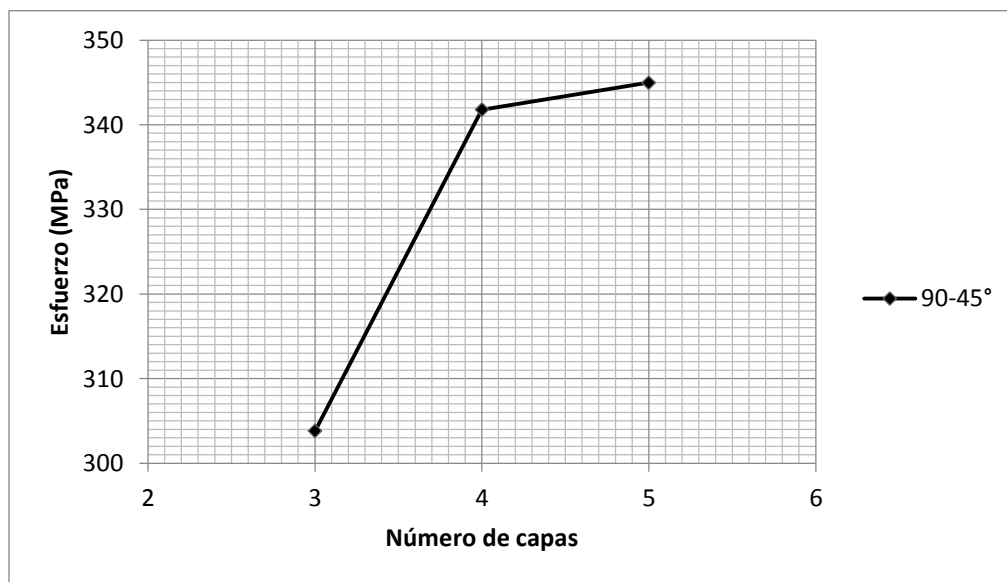


Figura 43. Gráfica de Esfuerzo vs número de capas con orientación de fibras 90-45°. [Autores]

GRAFICA ESFUERZO VS NÚMERO DE CAPAS 45-90°

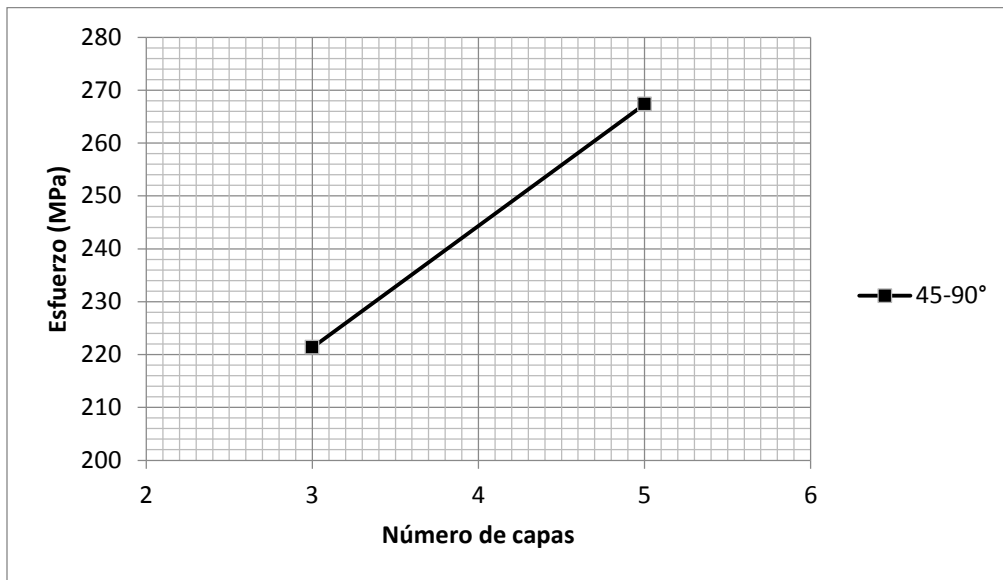


Figura 44. Gráfica de Esfuerzo vs número de capas con orientación de fibras 45-90°. [Autores]

GRAFICA ESFUERZO VS NÚMERO DE CAPAS 0-90°, 6K

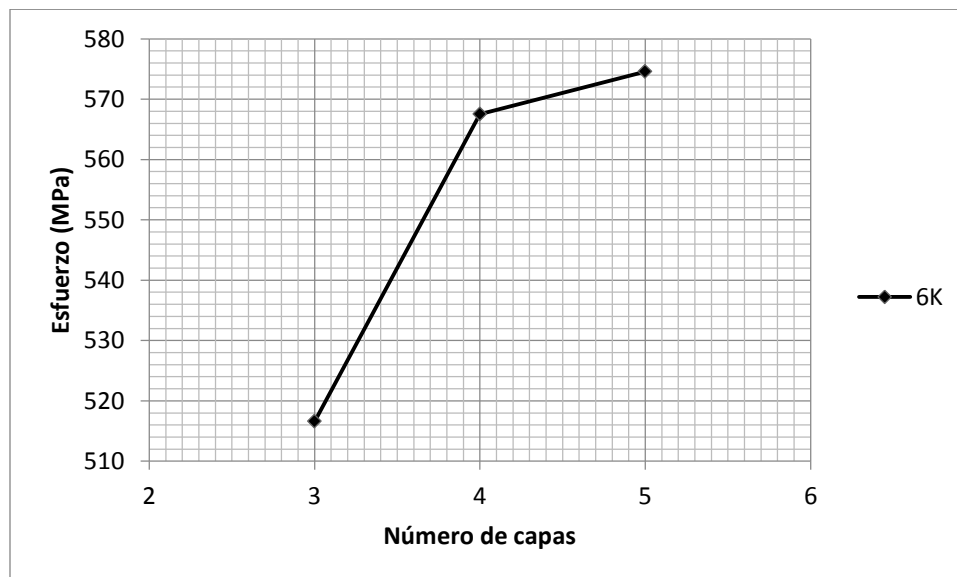


Figura 45. Gráfica de Esfuerzo vs número de capas con orientación de fibras 0-90°- fibra 6K. [Autores]

GRAFICA ESFUERZO VS NÚMERO DE CAPAS TODAS LAS PROBETAS
--

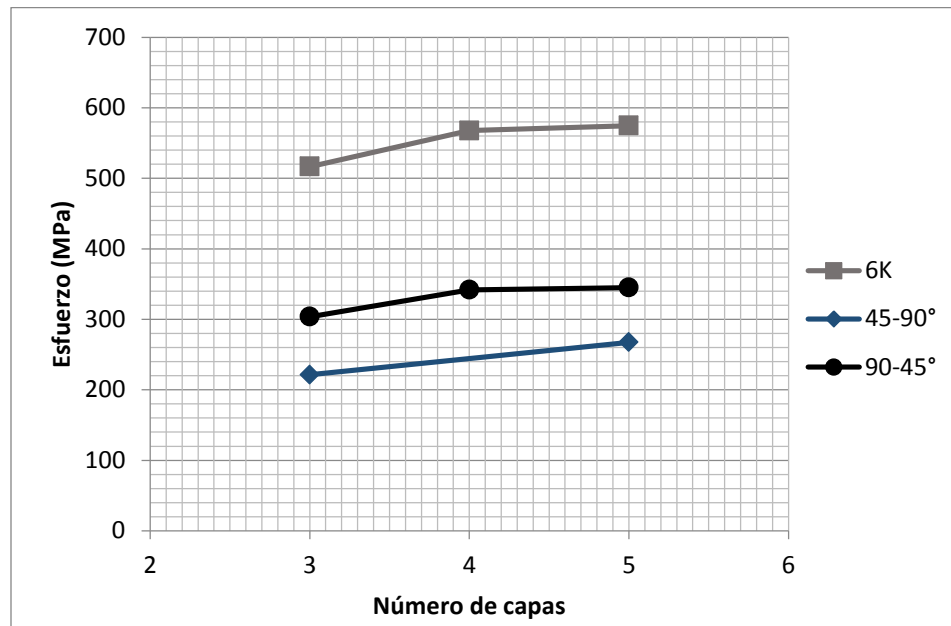


Figura 46. Gráfica de Esfuerzo vs número de capas de todas las probetas fabricadas. [Autores]

5.2.2. Gráfica de esfuerzo vs deformación

Este tipo de graficas me permite distinguir el comportamiento de los materiales compuestos en cuanto a la deformación causada a medida que se aumenta la carga en este caso los esfuerzos aplicados. Este tipo de graficas se subdivide en 2 tipos de gráficas.

5.2.2.1. Gráfica de esfuerzo vs deformación de probetas con igual cantidad de capas.

Para el propósito de analizar los resultados obtenidos en la prueba de tracción se graficaron los comportamientos de deformación con respecto a los esfuerzos soportados de las probetas que contienen la misma cantidad de capas apiladas, con el propósito de diferenciar cual es la disposición ideal en cuanto a resistencia a la tensión y deformación.

Para el análisis de este tipo de gráficos, es necesario poner a consideración las aclaraciones realizadas en el numeral 5.2.1, además de la siguiente aclaración:

- El número que precede a las especificaciones del orden de apilamiento de las fibras hace referencia a la cantidad de capas que componen cada probeta, por ejemplo:

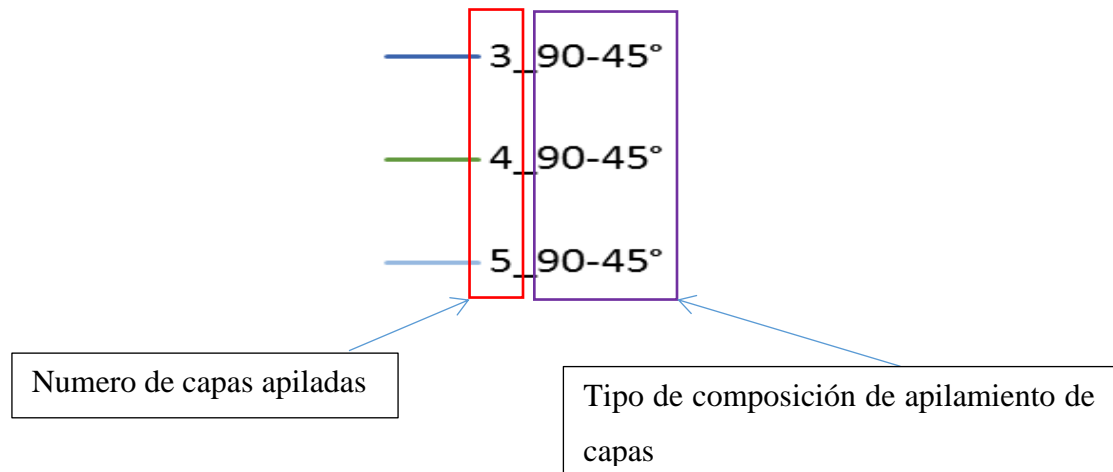


Figura 47. Descripción de codificación de probetas.

GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACION 3 CAPAS

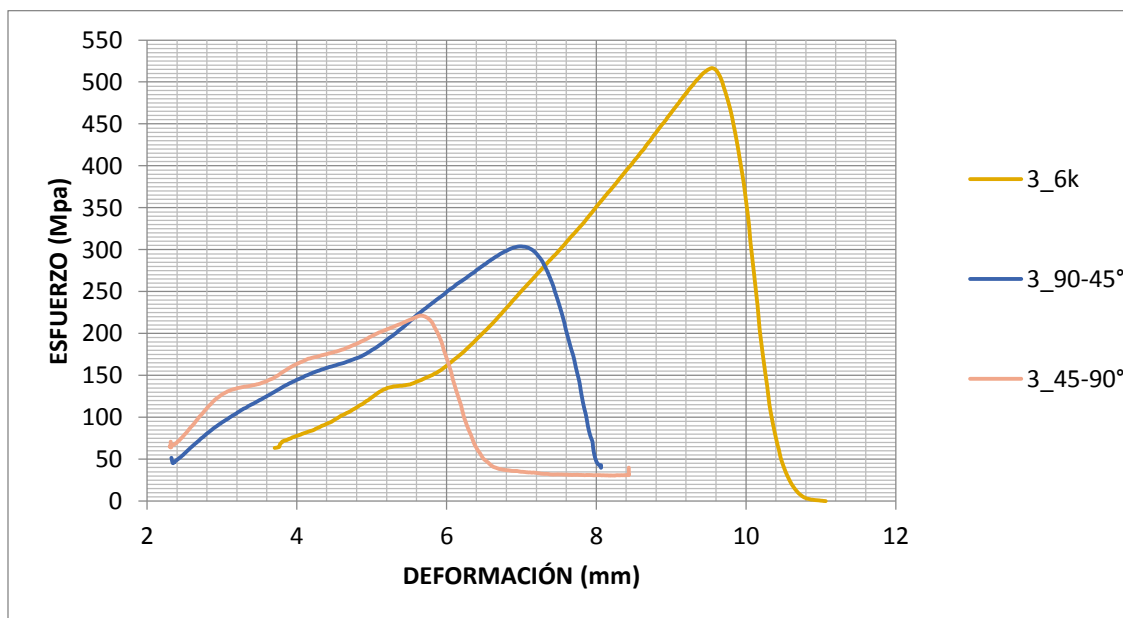


Figura 48. Gráfica de Esfuerzo vs deformación de 3 capas. [Autores]

GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACION 4 CAPAS

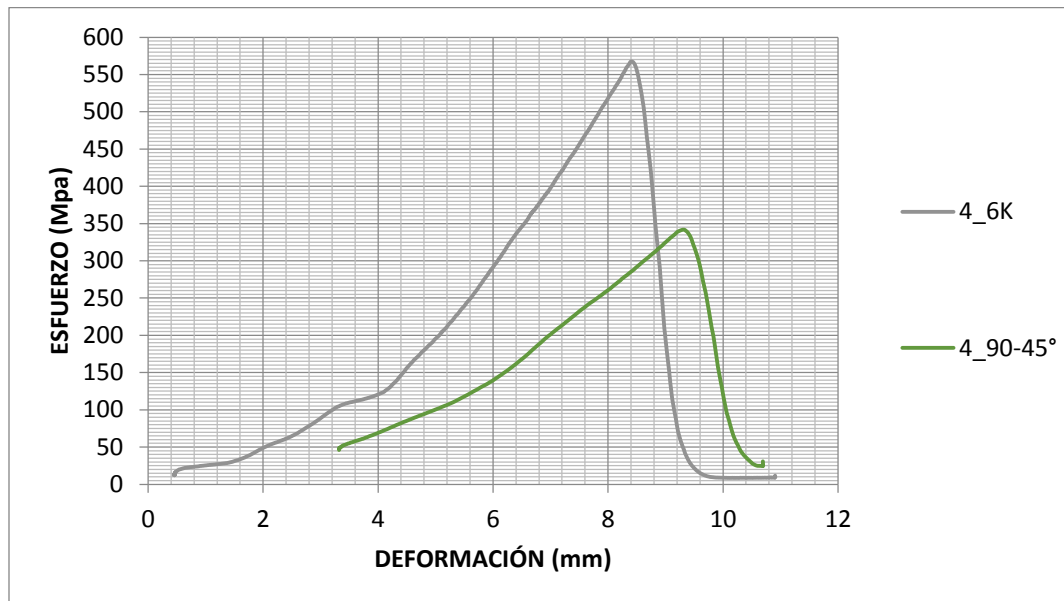


Figura 49. Gráfica de Esfuerzo vs deformación de 4 capas. [Autores]

GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACION 5 CAPAS

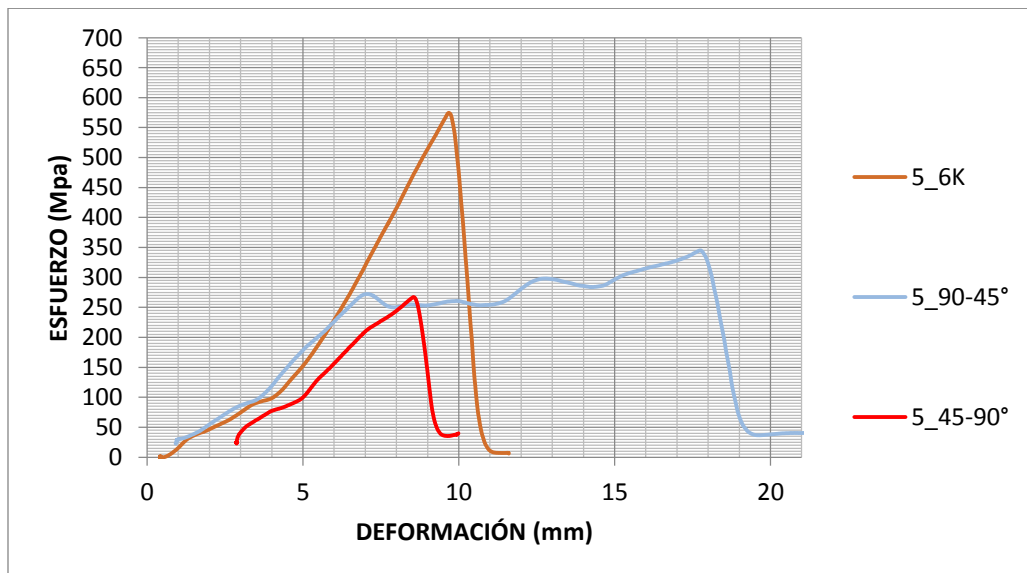


Figura 50. Gráfica de Esfuerzo vs deformación de probetas de 5 capas. [Autores]

5.2.2.2. Gráfica de esfuerzo vs deformación con la misma orientación de fibras.

Para este caso se hace una comparación en cuanto a esfuerzo y deformación de las probetas que tienen en su composición la misma configuración y disposición de las fibras, este tipo de graficas permite diferenciar el comportamiento de las propiedades de cada tipo de probetas en función de la cantidad de láminas de fibra apiladas.

GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACION 90-45°

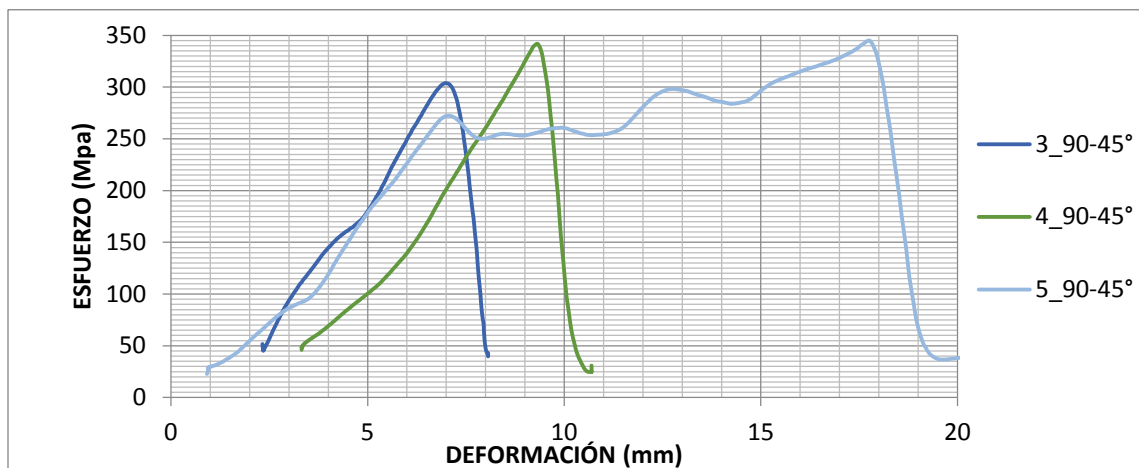


Figura 51. Gráfica de Esfuerzo vs deformación con orientación de fibras 90-45°. [Autores]

GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACION 45-90°



Figura 52. Gráfica de Esfuerzo vs deformación con orientación de fibras 45-90°. [Autores]

GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACION 0-90°,6K

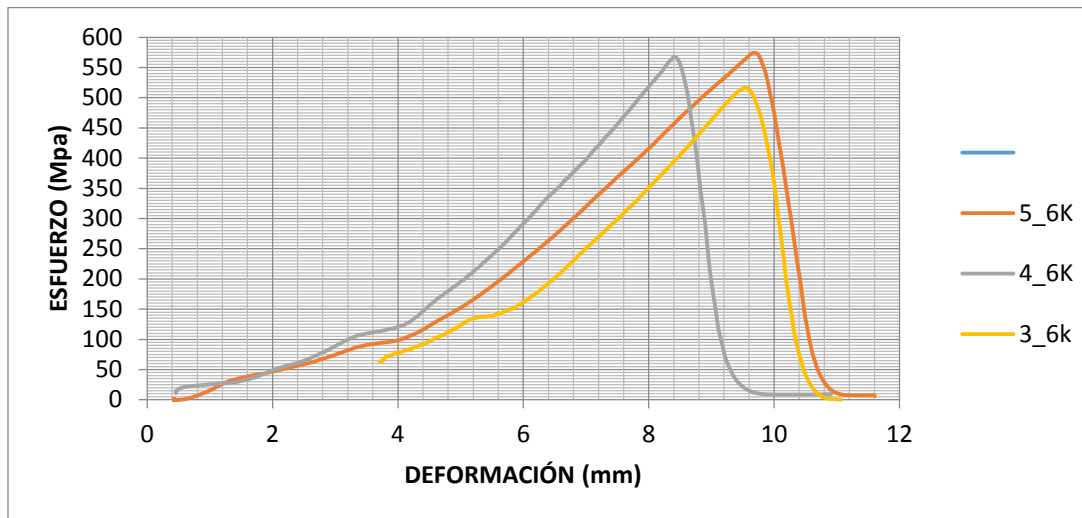


Figura 53. Gráfica de Esfuerzo vs deformación. [Autores]

Grafica obtenidas de Flexión

Con los datos obtenidos se crearon varias graficas donde se observa el comportamiento de un tubo de acero 4140 y una probeta de fibra de carbono con núcleo de madera balsa al someterlas a flexión.

Fuerza vs deformación tubo acero 4140

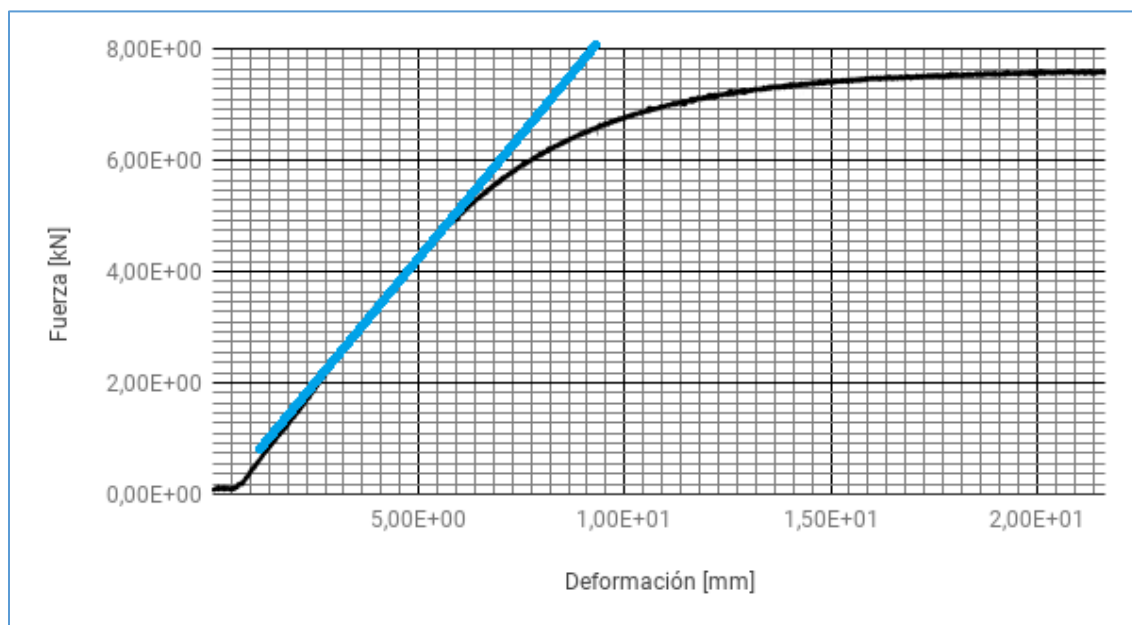


Figura 54. Gráfica de fuerza vs deformación para acero 4140. [Autores]

En la figura 33 se observa que la fuerza máxima soportada por el tubo de acero 4140 es de aproximadamente 7,8 kN y su zona elástica esta trazada por una línea recta la cual alcanzó valores aproximados de 5 kN, mientras su zona plástica, inicia donde la curva crece exponencialmente hasta estabilizarse tomando un valor aproximado de 5kN a 7.8 kN.

Fuerza vs deformación fibra de carbono con núcleo de madera balso

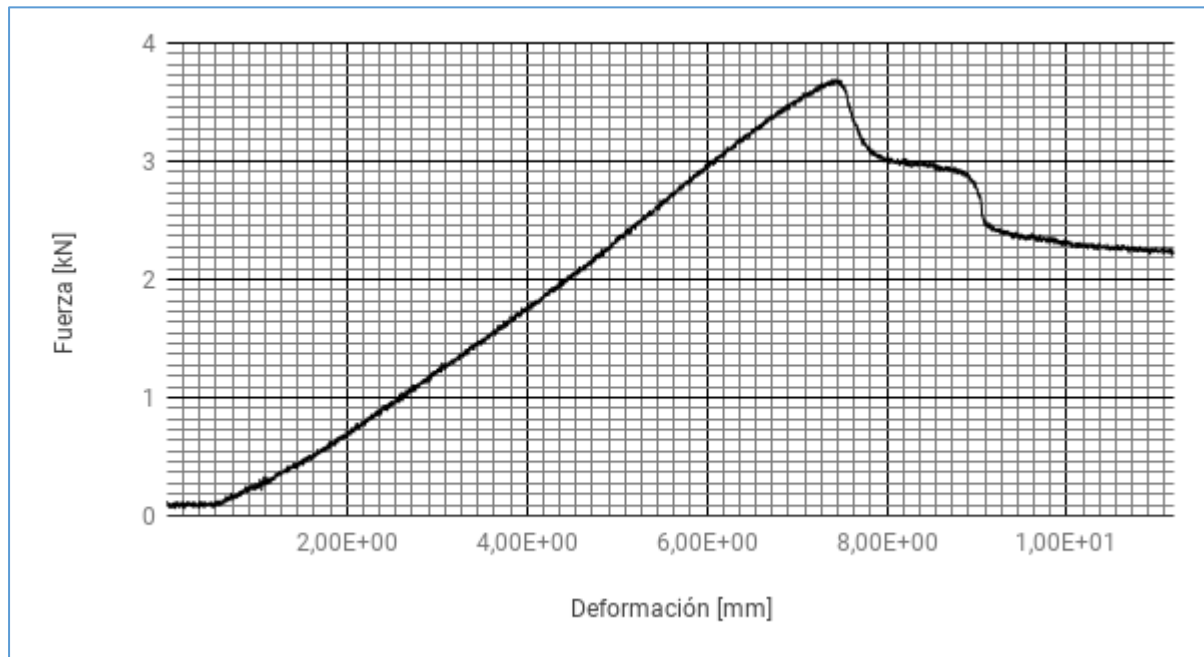


Figura 55. Grafica de fuerza deformación de fibra de carbono con núcleo de madera balso. [Autores]

En la gráfica se aprecia la fuerza máxima soportada por la probeta antes de reventar la capa superior de probeta siendo aproximadamente de 3.7 kN, también se observan varios picos los cuales corresponden a la rotura de la madera balso y a la capa inferior de la fibra de carbono.

Capítulo 6

6. ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis prueba de flexión:

Al observar el esfuerzo máximo del tubo de acero 4140 y el de la fibra de carbono con núcleo de madera balso, se puede apreciar que la fibra de carbono sometida a flexión es muy frágil, y por ende no soporta cargas significantes si no está soportada por un núcleo, pero al introducirle dicho elemento en este caso de madera se observa que su nivel de resistencia a flexión aumenta considerablemente en este caso soporta aproximadamente el 47 % de la carga total soportada por el acero 4140, lo que indica que si se obtiene un núcleo de un material compuesto más resistente que la madera y a la vez liviano como lo son los núcleos de PVC, se obtendrían crecimientos considerables en su resistencia y se podrá alcanzar el umbral de la norma SAE que consiste en crear una probeta que se aproxime o tenga la misma resistencia a la del acero con la cual está constituido el monocasco del carro de competencia.

Análisis de prueba de tracción:

El comportamiento en general de las gráficas muestra en su forma, una zona elástica pronunciada hasta alcanzar el esfuerzo máximo y posterior a esto se produce la rotura. Este es el comportamiento típico de los materiales compuestos en pruebas a tracción, debido a que los materiales compuestos en su mayoría no poseen una zona plástica como los metales. Realizando una comparación con el artículo “*Análisis comparativo de las propiedades mecánicas de un material compuesto reforzado con fibras de carbono y las de su matriz polimérica de resina epóxica*” [12] se puede observar que el comportamiento de las gráficas es similar. Adicionalmente, si nos remitimos a la comparativa de esfuerzos máximos soportados por las probetas, es importante resaltar que a pesar de que en dicha investigación trabajaron con probetas formadas con 6 capas apiladas, con una configuración simétrico balanceado cuasi-isotrópico (0/±45) y con fibra 3k; los resultados obtenidos fueron similares en comparación con nuestra investigación. Esto se evidencia al observar los esfuerzos máximos obtenidos, por las probetas especificadas en el artículo de investigación, lo cual ronda valores aproximados de 249 Mpa [12, p. 9]; y los resultados obtenidos en esta investigación utilizando la probeta de 4 capas con

orientación de $0-90^\circ$ y $\pm 45^\circ$, (la cual es la probeta que mejor se ajusta a las características de las probetas a comparar), alcanzó un valor aproximado de esfuerzo de 341 Mpa; que aunque se percibe un tanto mayor, resulta siendo un valor aproximado al valor obtenido en las pruebas del artículo mencionado.

En las gráficas en general se observa que la mejor disposición de fibras es aquella en la que se encuentra a $(0-90^\circ)$ en su totalidad (disposición de fibras que entrega el tipo de tela utilizado por defecto), esta disposición proporciona mayor magnitud en cuanto a fuerza y esfuerzo se refiere; además, se evidencia, que el tipo de fibra 6K ayuda a la obtención de valores más elevados de resistencia a la tracción. Todo lo anterior se fundamenta bajo la relación de cantidad de fibras que actúan en la dirección del esfuerzo aplicado al material. Esto lleva a deducir que la mejor disposición para efectos de resistencia a la tracción son las telas de fibra unidireccionales, ya que éstas, me garantizan que todas las fibras dispuestas en el tejido actúen en oposición a la carga aplicada.

A pesar de que los valores de esfuerzo obtenido en las probetas con 3 láminas y con una variación en la orientación de fibras ($0^\circ, 90^\circ$ y $\pm 45^\circ$), resultan siendo los más bajos en comparación de los obtenidos en las demás probetas, estos resultan siendo aceptables, en comparación a ciertos valores de esfuerzo obtenidos con algunos aceros, aluminios y otros materiales que comúnmente se utilizan para la fabricación de elementos utilizados en la industria del transporte.

Si se observan las figuras 51 y 52, encontramos una divergencia en cuanto a la deformación sufrida en la probeta 5_{90-45° , con respecto al comportamiento del resto de probetas. Esto se debe a problemas presentados en las láminas de sujeción con las mordazas de la máquina durante la prueba de tracción. El problema radica, en que dichas láminas no se adhirieron adecuadamente a la probeta, provocando deslizamientos durante la prueba de tracción.

Análisis del aluminio 2024 con respecto a la fibra de carbono:

Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4

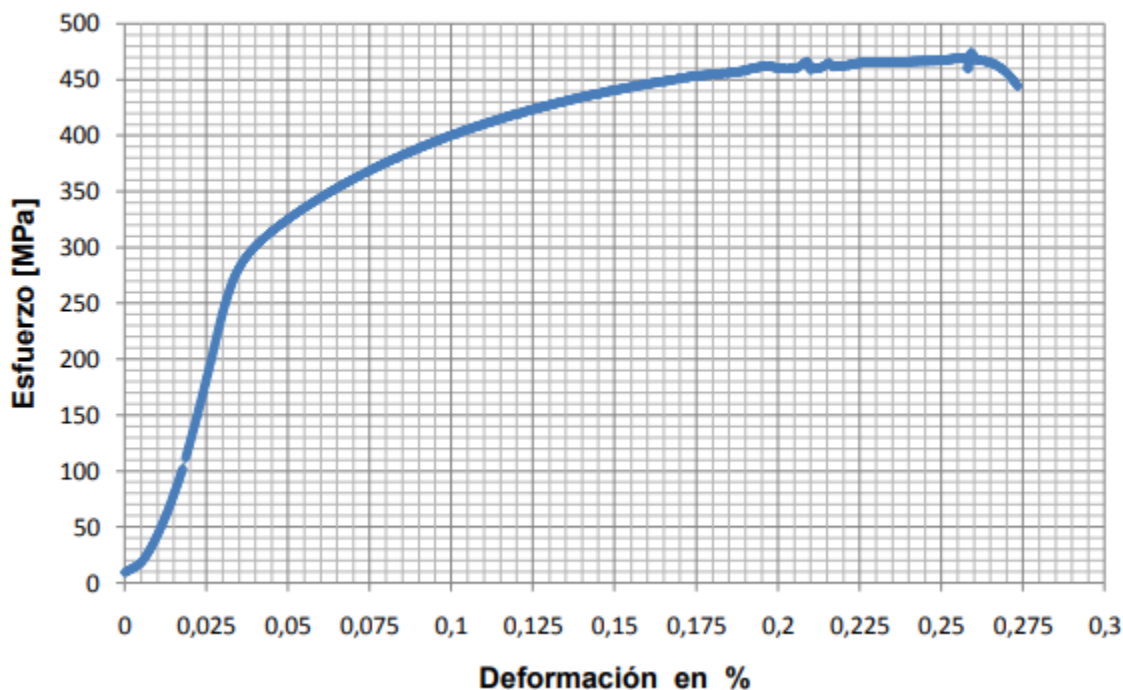


Figura 56. Diagrama de esfuerzo deformación, para el aluminio 2024 T4. [15]

El aluminio 2024 T4 es un elemento que está constituido por una aleación de níquel, lo cual hace que sea un elemento muy usado en la industria aeronáutica, ya que estas aleaciones son ligeras y resistentes, por ende al registrar su comportamiento con respecto a la fibra de carbono como se observa en la figura 57 (diagrama esfuerzo deformación del aluminio 2024 T4) hay un esfuerzo máximo de 450 Mpa y si se compara con la figura 50 (Gráfica de Esfuerzo vs deformación de la fibra de carbono) en la que se observa un esfuerzo máximo de 574 Mpa, para la probeta de fibra de carbono posicionada a 0-90° de 6k con 5 capas, se denota que resistió mayores cargas equivalente en un 21% más comparado con el aluminio 2024, obteniendo como resultado la importancia de utilizar la fibra de carbono, la cual resiste más y es más liviana, convirtiéndose en un elemento muy atractivo para la industria aeronáutica. Al registrar el comportamiento de la fibra de carbono con 3 capas, posicionada a 45-90 de 3k la cual presenta una resistencia de 221 Mpa ubicada en la figura 49, se registra que su resistencia fue menor en un 50% en comparación

con el aluminio 2024 T4, obteniendo como resultado que si se sabe posicionar las fibras y si se elige el número de capas adecuado se pueden tener valores de resistencia muy superiores o iguales con respecto a cualquier metal.

7. CONCLUSIONES

- El uso de la fibra de carbono en la industria aeronáutica resulta de gran importancia, ya que proporcionan buenas propiedades mecánicas, a bajo volumen y peso en la elaboración de elementos o partes de vehículos. Esta investigación deja abierto la posibilidad de seguir explorando la fabricación de piezas aeronáuticas ya que, con las pruebas realizadas, es posible hacer un estimado en cuanto a la cantidad y/o composición de fibra de carbono, (si es necesario con núcleo), partiendo de un esfuerzo demandado.
- A pesar de que la disposición o direccionamiento de las fibras a diferentes ángulos no obtuvo los mejores resultados en la prueba de tracción, esta disposición resulta siendo provechoso para algunas aplicaciones en donde se apliquen esfuerzos en diferentes direcciones.
- Si se elige un núcleo de buena resistencia y de un material liviano, se puede corregir el problema de fragilidad de la fibra de carbono al someterla a flexión y obtener valores de resistencia muy confiables para la construcción de elementos mecánicos.
- Al posicionar las fibras de manera adecuada y ubicar el número de capas correcto, se pueden alcanzar valores de resistencia a la tracción muy altos, incluso más altos que el del aluminio 2024 T4 u otros metales usados para la construcción de máquinas.
- Con este proyecto se forjaron bases para semillero de investigación de aeronáutica y el de la formula SAE, en el desarrollo de piezas elaboradas con fibra de carbono, aplicando las metodologías propuestas.
- En el desarrollo de la investigación se recolectó información importante que sirve como base para posteriores investigaciones en cuanto a fabricación de piezas con materiales compuestos.

- Al evaluar las propiedades mecánicas teniendo como parámetro a evaluar, la variación de dirección en que actúa las fibras de la tela de carbono, se verifica que la mejor disposición en cuanto a resistencia de esfuerzos, es aquella que permite tener la mayor cantidad de fibras en la dirección de la carga aplicada.
- La variación de la orientación angular de las fibras es un método que resulta ser provechoso en la elaboración de elementos que estén sometidos a esfuerzos en diferentes direcciones.

RECOMENDACIONES

Durante el proceso de laminación es importante utilizar elementos como las ventosas y el vacuómetro debido a que estas garantizan que el proceso de extracción de burbujas y compactación de láminas sea el adecuado, ya que esto repercute directamente en el acabado final de las probetas y por ende en las mismas propiedades mecánicas que estas pueden brindar.

En el momento de realizar el corte dimensional de las probetas es importante realizarlo con la herramienta adecuada, con el fin de exista precisión en el corte y así se garantice que las dimensiones de las probetas se a la deseada para efector de cumplimiento de la norma que se vaya a utilizar para realizar la prueba.

Respetar el tiempo de curado (tiempo aproximado de 72 horas), garantiza de igual manera obtener probetas con buen acabado y con mejores propiedades.

Hay que tener mucho cuidado en elementos que me garanticen un buen agarre entre la probeta y la mordaza de la maquina utilizada para la prueba de tracción, utilizar un pegamento especial que adhiera correctamente las láminas de aluminio en caso de que se utilicen.

REFERENCIAS

- [1] C. Pérez Alonso, Naval Composites: Los materiales compuestos y la industria naval, Universida Politécnica de Catalunya, Departamento de Ciencia e Ingeniería Náutica, 2016.
- [2] C. Edil da Costa, F. Velasco López y J. M. Torrabal, «Materiales compuestos de matriz metálica. I parte. Tipos, propiedades, aplicaciones,» *Revista Metalurgia*, nº 1, pp. 179-190, 2000.
- [3] Z. Castellanos López, S. J. González Vargas y G. A. Varón, Fabricación y Caracterización de un Material Compuesto de Matriz Polimérica con Refuerzo Metálico (Malla de Aluminio), Universidad de San Buenaventura, Facultad de Ingeniería Aeronáutica, 2009.
- [4] A. Besednjak Dietrich, Materiales compuestos, procesos de fabricación de Embarcaciones, Barcelona, España: ediciones UPC, 2005.
- [5] A. Salinas Hernández, Fabricación y Caracterización de Laminados de Material Compuesto a partir de Láminas Ultra Delgadas, Universidad de Sevilla, Escuela Superior de Ingeniería, 2016.
- [6] S. C. García Castillo, Análisis de Laminados de Materiales Compuestos con Precarga en su Plano y Sometido a Impacto, Univesidad Carlos III de Madrid, Departamento De Mecánica De Medios Continuos, 2007.
- [7] «Hexce,» [En línea]. Available: <http://www.hexcel.com>. [Último acceso: 1 Noviembre 2018].
- [8] bondrap, «BON DRAP BLOG,» [En línea]. Available: www.bondrap.com. [Último acceso: 1 Noviembre 2018].
- [9] A. Cavaler Pons, Menorquin Yacht, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Naval y Oceánica, 2008.
- [10] Open Course Ware, «Materiales compuestos de matriz orgánica: procesos de fabricación,» [En línea]. Available: https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/7038/mod_resource/content/1/materia_comp/tema-4-materiales-compuestos-de-matriz-organica-procesos-de-fabricacion.pdf. [Último acceso: 4

Noviembre 2018].

- [11] L. Cláudio Pardini y A. Gonçalves, Procesamiento de Compuestos Termoestructurales de Carbono reforzado con Fibras de Carbono, São José dos Campos- Brazil: Institute of Aeronautics and Space, 2009, pp. 232-240.
- [12] A. Nava Gastelum, M. Siqueiros Hernández, B. Gonzalez, Y. Vega y I. Mendoza Muñoz, «Análisis comparativo de las propiedades mecánicas de un material compuesto reforzado con fibras de carbono y las de su matriz polimérica de resina epóxica,» *Revista Maatérial*, vol. 23, n° 02, 2018.
- [13] ASTM D3039/D 3039 M-00 , «Standard Test Method for Tensile Propieties of Polymer Matrix Compo-site,» *ASTM INTERNATIONAL*, vol. 08, n° 01, pp. 105-116, 1997.
- [14] Formula SAE, Reglas Formula SAE 2019, SAE International, 2018.
- [15] V. `Rico Suárez, Analisis de las Propiedades Mecánicas de Tenacidad, Esfuerzo DE Tensión y Dureza de la Aleación de Aluminio 2024 T4,, Bogota, Colombia: Universidad Libre, Facultad de Igeniería Mecánica, 2016.
- [16] Carbon Fiber Stocks Composites supplier and Repair, «Carbon Fiber Stocks,» [En línea]. Available: www.carbonfiberstocks@gmail.com. [Último acceso: 13 02 2019].
- [17] Loctite, «Henkel,» 06 2010. [En línea]. Available: [https://tdsna.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/068BE424DF089A188525715C001BD4C3/\\$File/FREKPMC-EN.pdf](https://tdsna.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/068BE424DF089A188525715C001BD4C3/$File/FREKPMC-EN.pdf). [Último acceso: 13 02 2019].
- [18] Composan, «Composan Industrial y Tecnologia,» 04 2015. [En línea]. Available: http://www.composanindustrial.com/resources/archivosbd/productos_documentos/5be9cb796eae2818e7ed46de1e94cbd2.pdf. [Último acceso: 13 02 2019].
- [19] G. Tranasmeroum, «GTM,» 08 2014. [En línea]. Available: <http://www.gtm.net/images/industrial/a/ALCOHOL%20POLIVINILICO.pdf>. [Último acceso: 13 02 2019].
- [20] Airtech Intenational INC, «Quadcarbon,» 13 02 2014. [En línea]. Available: <http://atlcomposites.com.au/icart/products/122/images/main/Wrightlon%207400.pdf>. [Último acceso: 13 02 2019].
- [21] Airtech International INC, «Quadcarbon,» 06 08 2015. [En línea]. Available:

- https://quadcarbon.com.co/images/pdf/Wrightlon_3700_-EN.pdf. [Último acceso: 13 02 2019].
- [22] Airtech International INC, «Quadcarbon,» 21 08 2015. [En línea]. Available: <https://www.freemansupply.com/datasheets/Airtech/GS-213.pdf>. [Último acceso: 13 02 2019].
- [23] Himax, «Hexcel,» [En línea]. Available: <http://info.lindberg-lund.no/produktblad/Norge/46%20TD/FGE111%20800g%20glass%20quad.pdf>. [Último acceso: 13 02 2019].
- [24] Robinair, «Robinair,» 08 06 2015. [En línea]. Available: https://www.robinair.com/sites/default/files/552184_rev_d_tri_vacuum_pump_oil.pdf. [Último acceso: 13 02 2019].
- [25] Torayca, «Torayca,» [En línea]. Available: [file:///C:/Users/Usuario/Downloads/CFA-Std-Modulus-T300%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/CFA-Std-Modulus-T300%20(1).pdf). [Último acceso: 13 02 2019].
- [27] Composan, «Composan industria,» 5 2015. [En línea]. Available: http://www.composanindustrial.com/resources/archivosbd/productos_documentos/5be9cb796eae2818e7ed46de1e94cbd2.pdf. [Último acceso: 14 2 2019].

ANEXOS

Anexo 1. Ficha técnica de Resina Epóxica. [16]



www.Carbonfiberstocks.co
Carbonfiberstocks@gmail.com
(+57) 301 220 2873
Medellin - Colombia

RESINA EPOXICA PARA LAMINACION DE ALTAS PRESTACIONES

DESCRIPCION Resina Epoxica de altas prestaciones para laminacion de materiales compuestos polimericos reforzados con fibras, ideal para trabajar con Fibras de Carbono, Aramida (Kevlar) o Vidrio, de viscosidad media y libre de solventes.

- CARACTERISTICAS**
- Ideal para laminacion de materiales compuestos de altas prestaciones, especialmente con Fibras de Carbono, Aramida (Kevlar) o Vidrio.
 - Excelente impregnacion (humectacion) en fibras.
 - Facil de aplicar con brocha, espátula o por colada.
 - Cubre muy bien los bordes agudos.
 - Viscosidad media que la hace muy manejable.
 - Se puede trabajar con cargas como sistema de colada o relleno.
 - Cura a temperatura ambiente.
 - Minima contraccion termica en el curado.
 - Muy buena estabilidad dimensional.
 - Excelentes propiedades mecanicas.

CONDICIONES DE MEZCLA	CONDICION	VALOR
	Apariencia:	Líquido transparente leve ámbar
	Relación de mezcla por peso:	100 de A : 20 de B
	Densidad a 20°C:	1,07 +/-0,002 gr/cm ³
	Viscosidad (25°C):	1.300-1.500mPas
	Tiempo de uso (para 100 gr/mezcla):	35 - 40 minutos a 25°C
	Tiempo de desmolde:	20-24 horas
	Tiempo mínimo de curado:	24-36 horas

Para mayor información, comuníquese con nosotros al teléfono: +57 301 220 2873
Escribanos a los correos: Carbonfiberstocks@gmail.com
Visite nuestra página: www. Carbonfiberstocks.co

**PROPIEDADES
MECANICAS**
Propiedades después del endurecimiento

Curado: 7 días/temperatura ambiente o 12 horas/40°C

La Mezcla A comprende un laminado constituido por 7 capas de cinta de vidrio QT 57, de 3 mm de espesor.

Densidad		g/cm ³	1,1	1,5-1,6	1,1
Dureza Shore D	ISO 868		—	—	65-70
Resistencia a la compresión	ISO 604	N/mm ²	—	55	
Resistencia a la flexión	ISO 178	N/mm ²	270-300	40	25-30
Módulo de elasticidad a la flexión	ISO 178	N/mm ²	17000-18000	6500-7500	400-500
Resistencia al impacto	ISO 179	kJ/m ²	90-100	2,5	50-65
Contracción lineal (Probetas: 900 x 75 x 4 mm)		%	0,1-0,3	—	0,3-0,5
Contenido de vidrio	ISO DR 1633	%	58-60	—	—
Absorción de agua 10 días/23°C		%	0,49	0,45	—
1 hora/100°C		%	0,42	0,63	—
Temperatura de deflexión	ISO 75	°C	45-55*)	45-55	—

*) Determinada mediante ensayos de material sin refuerzo

**EMPAQUE Y
PRESENTACION**

El sistema epoxico para laminacion de altas prestaciones es un producto conformado por componentes A y B en proporcion 100:20 y se encuentra disponible de la siguiente manera:

PRESENTACION	COMPONENTE A	COMPONENTE B
1,2 kg mezcla	1 kg	200 gr
2,4 kg mezcla	2 kg	400 gr
6,0 kg mezcla	5 kg	1 kg
24 kg mezcla	20 kg	4 kg

Para mayor información, comuníquese con nosotros al teléfono: +57 301 220 2873
Escribanos a los correos: Carbonfiberstocks@gmail.com
Visite nuestra página: www.Carbonfiberstocks.co

SEGURIDAD

El endurecedor es un producto corrosivo y pueden causar irritaciones severas en la piel y en los ojos. No permita su contacto con los ojos, piel o la ropa. No inhale sus vapores.

Mantenga los recipientes de los productos bien cerrados cuando no lo estén usando o durante el transporte.

Si se presenta contacto con:

- **Ojos:** Lávese inmediatamente con agua por un tiempo no menor a 15 minutos.
- **Piel:** Lávese inmediatamente y en forma abundante con agua y jabón.
- **Inhalación:** Salga inmediatamente a un sitio donde haya aire fresco. Suministre oxígeno si hay dificultad para respirar.
- **Ingestión:** Si la persona está consciente, suministre abundante agua. **ACUDA INMEDIATAMENTE AL MÉDICO.**

RESPONSABILIDAD

Los datos contemplados en esta ficha técnica han sido realizados bajo condiciones estándar a nivel de laboratorio. Se pueden presentar algunos cambios debido a variaciones de humedad o temperatura al momento de la aplicación; por lo tanto siempre se recomienda hacer ensayos previos y representativos para asegurar resultados exitosos en campo.

Es una política de Carbon Fiber Stocks, asegurar la calidad constante de sus productos, pero no se asume ninguna responsabilidad por los resultados no exitosos, debido al empleo inadecuado de los productos o a una inadecuada aplicación de los mismos.

Anexo 2. Limpiador – desengrasante (frekote pmc). [17]

Technical Data Sheet

LOCTITE® Frekote PMC™

June 2010

PRODUCT DESCRIPTION

LOCTITE® Frekote PMC™ provides the following product characteristics:

Technology	Mold Release
Appearance	Clear liquid
Chemical Type	Solvent blend
Odor	Solvent
Cure	Room temperature cure
Application	Release Coatings
Application Temperature	20 to 30 °C

LOCTITE® Frekote PMC™ is a special blend of solvents designed to dissolve and remove wax from polyester molds without dulling the surface. This product can also be used to clean epoxy and metal mold surfaces as well as for cleaning brushes and equipment. LOCTITE® Frekote PMC™ is highly recommended for preparing polyester mold surfaces prior to application of Frekote® mold sealers and mold release agents.

TYPICAL PROPERTIES OF UNCURED MATERIAL

Specific Gravity @ 25 °C 0.821 to 0.854^{LMS}

Flash Point - See SDS

GENERAL INFORMATION

This product is not recommended for use in pure oxygen and/or oxygen rich systems and should not be selected as a sealant for chlorine or other strong oxidizing materials.

For safe handling information on this product, consult the Safety Data Sheet (SDS).

Directions for use:

1. LOCTITE® Frekote PMC™ should be applied to the mold surface with a clean lint free cloth.
2. Wax and other mold residue will immediately begin to dissolve and should be removed from the surface with a second clean cloth while it is still dissolved in the LOCTITE® Frekote PMC™.
3. As the cloth becomes saturated with wax and mold residue, dispose of it and use a new cloth.
4. Repeat process until composite and other mold residue is removed.
5. The mold is now ready for use.
6. **NOTE:** A simple test to assess mold cleanliness is the use of masking tape. A coated surface will allow easy release of masking tape, where as a wax free surface will allow good adhesion of masking tape. This test can also be used to determine the effectiveness of Frekote® Release Interfaces. A good interface will prevent any significant degree of tape adhesion.

Loctite Material Specification^{LMS}

LMS dated November 21, 2005. Test reports for each batch are available for the indicated properties. LMS test reports include selected QC test parameters considered appropriate to specifications for customer use. Additionally, comprehensive controls are in place to assure product quality and consistency. Special customer specification requirements may be coordinated through Henkel Quality.

Storage

The product is classified as flammable and must be stored in an appropriate manner in compliance with relevant regulations. Do not store near oxidizing agents or combustible materials. Store product in the unopened container in a dry location. Storage information may also be indicated on the product container labelling.

Optimal Storage: 8 °C to 21 °C. Storage below 8 °C or greater than 28 °C can adversely affect product properties.

Material removed from containers may be contaminated during use. Do not return product to the original container. Henkel cannot assume responsibility for product which has been contaminated or stored under conditions other than those previously indicated. If additional information is required, please contact your local Technical Service Center or Customer Service Representative.

TDS LOCTITE® Frekote PMC™, June 2010

Conversions

Reference 0.0

$(^{\circ}\text{C} \times 1.8) + 32 = ^{\circ}\text{F}$
 $\text{kV/mm} \times 25.4 = \text{V/mil}$
 $\text{mm} / 25.4 = \text{inches}$
 $\mu\text{m} / 25.4 = \text{mil}$
 $\text{N} \times 0.225 = \text{lb}$
 $\text{N/mm} \times 5.71 = \text{lb/in}$
 $\text{N/mm}^2 \times 145 = \text{psi}$
 $\text{MPa} \times 145 = \text{psi}$
 $\text{N-m} \times 8.851 = \text{lb-in}$
 $\text{N-m} \times 0.738 = \text{lb-ft}$
 $\text{N-mm} \times 0.142 = \text{oz-in}$
 $\text{mPa-s} = \text{cP}$

Note:

The information provided in this Technical Data Sheet (TDS) including the recommendations for use and application of the product are based on our knowledge and experience of the product as at the date of this TDS. The product can have a variety of different applications as well as differing application and working conditions in your environment that are beyond our control. Henkel is, therefore, not liable for the suitability of our product for the production processes and conditions in respect of which you use them, as well as the intended applications and results. We strongly recommend that you carry out your own prior trials to confirm such suitability of our product.

Any liability in respect of the information in the Technical Data Sheet or any other written or oral recommendation(s) regarding the concerned product is excluded, except if otherwise explicitly agreed and except in relation to death or personal injury caused by our negligence and any liability under any applicable mandatory product liability law.

In case products are delivered by Henkel Belgium NV, Henkel Electronic Materials NV, Henkel Nederland BV, Henkel Technologies France SAS and Henkel France SA please additionally note the following:

In case Henkel would be nevertheless held liable, on whatever legal ground, Henkel's liability will in no event exceed the amount of the concerned delivery.

In case products are delivered by Henkel Colombiana, S.A.S. the following disclaimer is applicable:

The information provided in this Technical Data Sheet (TDS) including the recommendations for use and application of the product are based on our knowledge and experience of the product as at the date of this TDS. Henkel is, therefore, not liable for the suitability of our product for the production processes and conditions in respect of which you use them, as well as the intended applications and results. We strongly recommend that you carry out your own prior trials to confirm such suitability of our product.

Any liability in respect of the information in the Technical Data Sheet or any other written or oral recommendation(s) regarding the concerned product is excluded, except if otherwise explicitly agreed and except in relation to death or personal injury caused by our negligence and any liability under any applicable mandatory product liability law.

In case products are delivered by Henkel Corporation, Resin Technology Group, Inc., or Henkel Canada Corporation, the following disclaimer is applicable:

The data contained herein are furnished for information only and are believed to be reliable. We cannot assume responsibility for the results obtained by others over whose methods we have no control. It is the user's responsibility to determine suitability for the user's purpose of any production methods mentioned herein and to adopt such precautions as may be advisable for the protection of property and of persons against any hazards that may be involved in the handling and use thereof. In light of the foregoing, **Henkel Corporation specifically disclaims all warranties expressed or implied, including warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, arising from sale or use of Henkel Corporation's products. Henkel Corporation specifically disclaims any liability for consequential or incidental damages of any kind, including lost profits.** The discussion herein of various processes or compositions is not to be interpreted as representation that they are free from domination of patents owned by others or as a license under any Henkel Corporation patents that may cover such processes or compositions. We recommend that each prospective user test his proposed application before repetitive use, using this data as a guide. This product may be covered by one or more United States or foreign patents or patent applications.

Trademark usage

Except as otherwise noted, all trademarks in this document are trademarks of Henkel Corporation in the U.S. and elsewhere. ® denotes a trademark registered in the U.S. Patent and Trademark Office.

Americas
+860.571.5100

Europe
+49.89.320800.1800

Asia
+86.21.2891.8863

For the most direct access to local sales and technical support visit www.henkel.com/industrial

- **Anexo 3. Manta absorbente.** [18]

**FICHA TÉCNICA**

División	ABSORBENTES
Página	1 / 1
Índice	Rev.: Abril 2015

1. Campo de aplicación**MANTA ABSORBENTE****2. Definición**

Rollos y paños absorbentes de polipropileno perforados. Se puede utilizar para controlar los derrames en acuáticos y terrestres. Absorbe el aceite y disolventes orgánicos y no absorben agua.

3. Campo de aplicación

Diseñado para contener y absorber derrames en situaciones de emergencia en ambientes acuáticos y terrestres. Absorbe el petróleo, hidrocarburos, combustibles, solventes y productos de limpieza sin absorber agua.

4. Parámetros técnicos

- | | |
|--------------------------------------|--|
| • Capacidad de absorción | 70-140 litros/rollo y 140 litros/bolsa |
| • Tiempo de saturación | 20 segundos |
| • Tolerancia de las especificaciones | 10% |

5. Dimensiones y embalaje

- Rollos de 50 cm de ancho x 40 m de longitud, en bolsas de PE
- Rollo de 1 m de ancho x 40 cm de longitud, en bolsas de PE
- Paños de 50 cm x 40 cm, en bolsas de PE con 200 paños

6. Características técnicas

Según el comunicado de la institución de la referencia de Salud del Estado, válida desde 07/10/2008 CZŽP13-1443/08-229, los productos mencionados aquí son seguros para la salud humana en relación con el contacto con la piel.

7. Eliminación

Debe eliminarse respetando en todo momento la legislación aplicable. Téngase en cuenta que la naturaleza del líquido absorbido afecta a las propiedades del material absorbente utilizado.

Esta información sustituye a las anteriores. Las especificaciones y datos técnicos que aparecen en este folleto son de carácter orientativo, correspondiendo a valores medios de laboratorio. Composan se reserva el derecho a modificarlos sin previo aviso y deniega cualquier responsabilidad por un uso indebido.

- **Anexo 4. Alcohol polivinílico. [19]**



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

Nombre del Producto: **ALCOHOL POLIVINILICO**
 Fecha de Revisión: Agosto 2014. Revisión N°3



SECCION 1 : IDENTIFICACION DEL PRODUCTO Y DE LA COMPAÑÍA

PRODUCTO

Nombre Químico: ALCOHOL POLIVINILICO – (CH₂CHOH)_n
Número CAS: 9002-89-5
Sinónimos: Etenol; Homopolímero; PVA; PVOH

COMPAÑÍA: GTM

Teléfonos de Emergencia

México : +55 5831 7905 – SETIQ 01 800 00 214 00
 Guatemala: +502 66285858
 El Salvador: +503 22517700
 Honduras: +504 2540 2520
 Nicaragua: +505 2269 0361 – Toxicología MINSA: +505 22897395
 Costa Rica: +506 25370010 – Emergencias 9-1-1. Centro Intoxicaciones +506 2223-1028
 Panamá: +507 5126182 – Emergencias 9-1-1
 Colombia: +018000 916012 Cisproquim / (571) 2 88 60 12 (Bogotá)
 Perú: +511614 65 00
 Ecuador: +593 2382 6250 – Emergencias (ECU) 9-1-1
 Argentina +54 115031 1774

SECCION 2 : COMPOSICION / INFORMACION SOBRE LOS INGREDIENTES

ALCOHOL POLIVINILICO

CAS: 9002-89-5


100%

SECCION 3 : IDENTIFICACION DE PELIGROS

Clasificación ONU: No regulado

Clasificación NFPA: Salud: 1 Inflamabilidad: 2 Reactividad: 0

• Anexo 5. Bolsas de vacío. [20]



5700 Skylab Road
Huntington Beach
CA 92647 USA

Phone : +1 714-899-8100
Fax : +1 714-899-8179

E-mail : airtech@airtechintl.com
Website : www.airtechonline.com

Data Sheet

WRIGHTLON® 7400

Vacuum bagging film

■ DESCRIPTION

WL 7400 is a heat-stabilized nylon film with high elongation which is suitable for cure temperatures up to 400°F (204°C). WL7400 is also offered with our embossed, cracked ice pattern making it a breather, release film and vacuum bag all-in-one.

■ TECHNICAL DATA

		Test method
Material type	Nylon	
Elongation at break	400 %	ASTM D 882
Tensile strength	8000 psi (55 MPa)	ASTM D 882
Maximum use temperature	400 °F (204 °C)	
Melt point (minimum), crystalline	420 °F (215 °C)	ASTM D 789-94
Flammability (self extinguishing)	Yes	ATP-5034
Materials to avoid	Phenolic resins/Strong oxidizers	
Color	Green	
Shelf life	Indefinite	

■ SIZES

Consult the dimensional chart in this section for dimensional information. Other sizes available on special order.

■ NOTES

- > Maximum use temperature is dependent upon the duration at maximum temperature and is process specific. Airtech recommends testing prior to use.
- > Other sizes available upon request. Minimum order may be required.
- > Custom designed shapes and sizes are available to fit your individual requirements. Please consult Airtech for further information.

- **Anexo 6. Plástico perforado.** [21]



5700 Skylab Road
Huntington Beach
CA 92647 USA

Phone : +1 714-899-8100
Fax : +1 714-899-8179

E-mail : airtech@airtechintl.com
Website : www.airtechonline.com

Data Sheet

WRIGHTLON® 3700

Low cost release film for commercial and wind energy applications

■ DESCRIPTION

Wrightlon® 3700 is a release film that is designed for low cost applications. Wrightlon® 3700 will release from epoxy, polyester and vinyl ester resin systems.

■ BENEFITS

- Good value for low to medium temperature applications.
- Blue color is visible on laminate surface.
- Available in P16 perforation style, especially for infusion applications.

■ TECHNICAL DATA

		Test method
Material type	Polyolefin	
Elongation at break	550 %	ASTM D 882
Tensile strength	7000 psi (48 MPa)	ASTM D 882
Maximum use temperature	250°F (121°C)	
Materials to avoid	Phenolic resins/Strong oxidizers	
Color	Blue	
Shelf life	Unlimited when stored in original packaging at 72°F (22°C)	

■ SIZES

Thickness	Width	Length	Weight / Roll	Forms Available*
0.001 inch (25 µm)	60 inches (1.52 m)	2000 feet (610 m)	96 lbs (44 kg)	SHT
0.002 inch (50 µm)	60 inches (1.52 m)	1000 feet (305 m)	96 lbs (44 kg)	SHT

- Custom shapes and sizes are available, please contact Airtech for more information.
- * SHT = sheeting

■ NOTES

- The maximum use temperature is dependent upon the duration at maximum temperature and is process specific, Airtech recommends testing prior to use.
- Watch a demo video of Wrightlon® 3700 in the "Media Center" on our website.

- Anexo 7. Cinta de vacío (taki pei). [22]



5700 Skylab Road
Huntington Beach
CA 92647 USA

Phone : +1 714-899-8100
Fax : +1 714-899-8179

E-mail : airtech@airtechintl.com
Website : www.airtechonline.com

Data Sheet

GS-213

Industry standard vacuum bag sealant tape for metal and composite tools

■ DESCRIPTION

GS-213 is recognized worldwide as the work horse for the composites and bonding industries. It has excellent tack, great clean-up, and is usable up to 400°F (204°C).

■ BENEFITS

- Excellent tack level, so vacuum bagging is easier and safer.
- Excellent clean up reduces cost of tool cleaning.
- Approved on aerospace specifications worldwide.

■ TECHNICAL DATA

Color	Off-white
Base material	Synthetic rubber
Maximum use temperature	400°F (204°C)
Shelf life	12 months from date of manufacture
Storage conditions	Tape must be stored flat in original packaging at 72°F (22°C) Do not refrigerate

■ SIZES


Dimensions	Packaging
1/8 inch x 1/2 inch x 25 feet (3 mm x 12 mm x 7.5 m)	40 rolls per case
1/8 inch x 3/4 inch x 25 feet (3 mm x 19 mm x 7.5 m)	28 rolls per case



■ NOTES


- For clean removal, it is recommended to strip the tape from the mold surface once it has cooled down to room temperature.
- The maximum use temperature is dependent upon the duration at maximum temperature and is process specific, Airtech recommends testing prior to use.

• Anexo 8. Fibra de vidrio. [23]



HiMax™ GGL4008

FGE111 [GE, 800, 0/+45/90/-45]



Product Data Sheet

Fabric Construction

Fibre Type: E-Glass

Construction: 0/+45/90/-45

Fabric Weight: 810 gsm +/- 5%

Ply Construction

0°

Fibre Specification: E-Glass

Fibre Tex: 600 tex

Gauge: 8.5 gg

Ply Weight: 201 gsm

Layer 3: +45°

Fibre Specification: E-Glass

Fibre Tex: 300 tex

Gauge: 12 gg

Ply Weight: 200 gsm

Layer 2: 90°

Fibre Specification: E-Glass

Fibre Tex: 600 tex

Gauge: 8.5 gg

Ply Weight: 201 gsm

Layer 1: -45°

Fibre Specification: E-Glass

Fibre Tex: 300 tex

Gauge: 12 gg

Ply Weight: 200 gsm

Stitching Fibre

Stitching Thread: Texturised Polyester

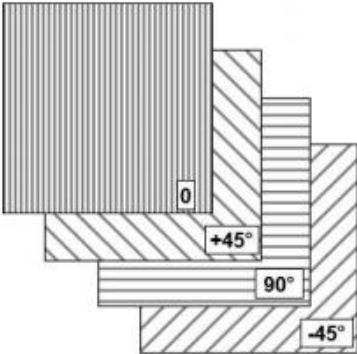
Stitch DTex: 78

Stitch Gauge: 6.0 gg

Stitch Length: 2.22 mm

Stitch Type: 1/2 Pillar Tricot

Stitch Weight: 8 gsm



Customisation

Customer Code and Description: Customer Specified

Fabric Width: 1270mm (+/- 5mm) - or tapes on application

Tracer Threads / Tapered Edges: Customer Specified

Approved Fibres: On Application

Roll Weight / Length: Customer Specified

Cardboard Core: Customer Specified

Packaging: Customer Specified



HiMax™ GGL4008
FGE111 [GE, 800, 0/+45/90/-45]



Product Data Sheet

For more information

Hexcel is a worldwide supplier of composite materials to aerospace and industrial markets. Our comprehensive range includes:

- HexTow® carbon fibres
- HexForce® reinforcements
- HiMax™ non-crimp fabrics
- HexPly® prepregs
- HexMC® moulding compounds
- HexFlow® RTM resins
- Redux® adhesives
- HexTool® tooling materials
- HexWeb® honeycombs
- Acousti-Cap® sound attenuating honeycomb
- Engineered core
- Engineered products

For quotes, orders and product information call +44 116 275 2200. For other worldwide sales office telephone numbers and a full address list, please go to:

<http://www.hexcel.com/contact/salesoffice>

- **Anexo 9. Bomba de vacío.** [24]

Safety Data Sheet

Issue Date: 08-Jan-2015

Revision Date: 20-Apr-2015

552184 REV D

1. IDENTIFICATION

Product Identifier**Product Name** Vacuum Pump Oil**Other means of identification****SDS #** 552184 REV D**Recommended use of the chemical and restrictions on use****Recommended Use** Automotive Care Products.**Details of the supplier of the safety data sheet****Distributor**

Bosch Automotive Service Solutions LLC
655 Eisenhower Drive
Owatonna, MN 55060 USA

Emergency Telephone Number

Company Phone Number (800) 822-5561
Emergency Telephone (24 hr) INFOTRAC 1-352-323-3500 (International)
1-800-535-5053 (North America)

2. HAZARDS IDENTIFICATION

Appearance Bright and clear liquid**Physical State** Liquid**Odor** Slight hydrocarbon**Classification**

This chemical does not meet the hazardous criteria set forth by the 2012 OSHA Hazard Communication Standard (29 CFR 1910.1200). However, this Safety Data Sheet (SDS) contains valuable information critical to the safe handling and proper use of this product. This SDS should be retained and available for employees and other users of this product.

3. COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS

Chemical Name	CAS No	Weight-%
Petroleum distillates, hydrotreated heavy paraffinic	64742-54-7	100

If Chemical Name/CAS No is "proprietary" and/or Weight-% is listed as a range, the specific chemical identity and/or percentage of composition has been withheld as a trade secret.

552184 REV D - Vacuum Pump Oil

Revision Date: 20-Apr-2015

4. FIRST-AID MEASURES

First Aid Measures

Eye Contact	Rinse immediately with plenty of water, also under the eyelids, for at least 15 minutes. If irritation develops or persists seek medical attention.
Skin Contact	Wash skin with soap and water. Take off contaminated clothing and wash it before reuse. If irritation persists, seek medical attention.
Inhalation	Vaporization is not expected at ambient temperatures. This material is not expected to cause inhalation-related disorders under anticipated conditions of use. In case of overexposure, move the person to fresh air. If not breathing, give artificial respiration. Get immediate medical attention.
Ingestion	Do not induce vomiting. Give large quantities of water. Get medical attention. Never give anything by mouth to an unconscious person.

Most important symptoms and effects

Symptoms	Not determined.
-----------------	-----------------

Indication of any immediate medical attention and special treatment needed

Notes to Physician	Treat symptomatically.
---------------------------	------------------------

5. FIRE-FIGHTING MEASURES

Suitable Extinguishing Media

Carbon dioxide (CO₂). Dry chemical. Foam. Water spray (fog).

Unsuitable Extinguishing Media Water may be ineffective, but can be used to protect firefighters and cool containers. Do not use water jet as an extinguisher, as this will spread the fire.

Specific Hazards Arising from the Chemical

Combustion products may be toxic.

Protective equipment and precautions for firefighters

As in any fire, wear self-contained breathing apparatus pressure-demand, MSHA/NIOSH (approved or equivalent) and full protective gear.

6. ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

Personal precautions, protective equipment and emergency procedures

Personal Precautions	Use personal protection recommended in Section 8.
Environmental Precautions	Prevent from entering into soil, ditches, sewers, waterways and/or groundwater. See Section 12, Ecological Information. See Section 13: DISPOSAL CONSIDERATIONS.

Methods and material for containment and cleaning up

Methods for Containment	Prevent further leakage or spillage if safe to do so.
Methods for Clean-Up	Contain and collect with an inert absorbent and place into an appropriate container for disposal. Spill area may be slippery.

552184 REV D - Vacuum Pump Oil

Revision Date: 20-Apr-2015

7. HANDLING AND STORAGE

Precautions for safe handling

Advice on Safe Handling

Handle in accordance with good industrial hygiene and safety practice. Use personal protection recommended in Section 8. Avoid contact with skin, eyes or clothing. Wash face, hands, and any exposed skin thoroughly after handling. Keep containers closed when not in use. Keep away from heat/sparks/open flames/hot surfaces. — No smoking.

Conditions for safe storage, including any incompatibilities

Storage Conditions

Keep container tightly closed and store in a cool, dry and well-ventilated place.

Incompatible Materials

Strong oxidizing agents.

8. EXPOSURE CONTROLS/PERSONAL PROTECTION

Exposure Guidelines

No exposure limits noted for ingredient(s). The following information is given as general guidance

Appropriate engineering controls

Engineering Controls

Ensure adequate ventilation, especially in confined areas. Eyewash stations. Showers.

Individual protection measures, such as personal protective equipment

Eye/Face Protection

Chemical splash goggles or face shield.

Skin and Body Protection

Chemical resistant, impermeable gloves. Suitable protective clothing.

Respiratory Protection

Not required under normal conditions. If recommended levels are exceeded, respiratory protection must be selected to assure compliance with OSHA Standard 29CFR 1910.134.

General Hygiene Considerations

Handle in accordance with good industrial hygiene and safety practice.

9. PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

Information on basic physical and chemical properties

Physical State

Liquid

Appearance

Bright and clear liquid

Color

Bright and clear

Odor

Slight hydrocarbon

Odor Threshold

Not determined

Property

Values

Remarks • Method

pH

Not determined

Melting Point/Freezing Point

Not determined

Boiling Point/Boiling Range

Not determined

Flash Point

216 °C / 421 °F

COC

Evaporation Rate

Not determined

Flammability (Solid, Gas)

Liquid-not applicable

Upper Flammability Limits

Not determined

Lower Flammability Limit

Not determined

Vapor Pressure

Not determined

Vapor Density

Not determined

Specific Gravity

0.9158

@ 60°F

Water Solubility

Negligible

Solubility in other solvents

Not determined

Partition Coefficient

Not determined

Auto-Ignition Temperature

Not determined

Decomposition Temperature

Not determined

Kinematic Viscosity

Not determined

Dynamic Viscosity

Not determined

Explosive Properties

Not determined

Oxidizing Properties

Not determined

552184 REV D - Vacuum Pump Oil

Revision Date: 20-Apr-2015

10. STABILITY AND REACTIVITY**Reactivity**

Not reactive under normal conditions.

Chemical Stability

Stable under recommended storage conditions.

Possibility of Hazardous Reactions

None under normal processing.

Hazardous Polymerization

Hazardous polymerization does not occur.

Conditions to Avoid

Keep separated from incompatible substances. Keep out of reach of children.

Incompatible Materials

Strong oxidizing agents.

Hazardous Decomposition Products

Smoke, carbon monoxide, carbon dioxide, aldehydes, and other products of incomplete combustion including oxides of nitrogen and sulfur.

11. TOXICOLOGICAL INFORMATION**Information on likely routes of exposure****Product Information****Eye Contact**

Avoid contact with eyes.

Skin Contact

Avoid contact with skin.

Inhalation

Avoid breathing vapors or mists.

Ingestion

Do not ingest.

Component Information

Not available

Information on physical, chemical and toxicological effects**Symptoms**

Please see section 4 of this SDS for symptoms.

552184 REV D - Vacuum Pump Oil

Revision Date: 20-Apr-2015

Delayed and immediate effects as well as chronic effects from short and long-term exposure**Carcinogenicity**

The component below belongs to the petroleum family, which has been shown to contain carcinogenic substances depending on the level of refinement. The carcinogen classification need not apply if it can be shown that the substance contains less than 3% dimethyl sulfoxide extract.

Chemical Name	ACGIH	IARC	NTP	OSHA
Petroleum distillates, hydrotreated heavy paraffinic 64742-54-7	A2	Group 1		X

Legend

ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists)

A2 - Suspected Human Carcinogen

IARC (International Agency for Research on Cancer)

Group 1 - Carcinogenic to Humans

OSHA (Occupational Safety and Health Administration of the US Department of Labor)

X - Present

Numerical measures of toxicity

Not determined

12. ECOLOGICAL INFORMATION**Ecotoxicity**

The product is not classified as environmentally hazardous. However, this does not exclude the possibility that large or frequent spills can have a harmful or damaging effect on the environment.

Component Information

Chemical Name	Algae/aquatic plants	Fish	Toxicity to microorganisms	Crustacea
Petroleum distillates, hydrotreated heavy paraffinic 64742-54-7		5000: 96 h Oncorhynchus mykiss mg/L LC50		1000: 48 h Daphnia magna mg/L EC50

Persistence/Degradability

Not determined.

Bioaccumulation

Not determined.

Mobility

Not determined

Other Adverse Effects

Not determined

13. DISPOSAL CONSIDERATIONS**Waste Treatment Methods****Disposal of Wastes**

Disposal should be in accordance with applicable regional, national and local laws and regulations.

Contaminated Packaging

Disposal should be in accordance with applicable regional, national and local laws and regulations.

552184 REV D - Vacuum Pump Oil

Revision Date: 20-Apr-2015

14. TRANSPORT INFORMATION

Note Please see current shipping paper for most up to date shipping information, including exemptions and special circumstances.

DOT Not regulated

IATA Not regulated

IMDG Not regulated

15. REGULATORY INFORMATION**International Inventories**

Chemical Name	TSCA	DSL	NDSL	EINECS	ELINCS	ENCS	IECSC	KECL	PICCS	AICS
Petroleum distillates, hydrotreated heavy paraffinic	Present	X		Present		Present	X	Present	X	X

Legend:

TSCA - United States Toxic Substances Control Act Section 8(b) Inventory

DSL/NDSL - Canadian Domestic Substances List/Non-Domestic Substances List

EINECS/ELINCS - European Inventory of Existing Chemical Substances/European List of Notified Chemical Substances

ENCS - Japan Existing and New Chemical Substances

IECSC - China Inventory of Existing Chemical Substances

KECL - Korean Existing and Evaluated Chemical Substances

PICCS - Philippines Inventory of Chemicals and Chemical Substances

AICS - Australian Inventory of Chemical Substances

US Federal Regulations**CERCLA**

This material, as supplied, does not contain any substances regulated as hazardous substances under the Comprehensive Environmental Response Compensation and Liability Act (CERCLA) (40 CFR 302) or the Superfund Amendments and Reauthorization Act (SARA) (40 CFR 355).

SARA 313

Section 313 of Title III of the Superfund Amendments and Reauthorization Act of 1986 (SARA). This product does not contain any chemicals which are subject to the reporting requirements of the Act and Title 40 of the Code of Federal Regulations, Part 372

CWA (Clean Water Act)

This product does not contain any substances regulated as pollutants pursuant to the Clean Water Act (40 CFR 122.21 and 40 CFR 122.42)

US State Regulations**California Proposition 65**

This product does not contain any Proposition 65 chemicals.

U.S. State Right-to-Know Regulations

This product does not contain any substances regulated under applicable state right-to-know regulations

552184 REV D - Vacuum Pump Oil

Revision Date: 20-Apr-2015

16. OTHER INFORMATION

<u>NFPA</u>	Health Hazards	Flammability	Instability	Special Hazards
	0	1	0	Not determined
<u>HMIS</u>	Health Hazards	Flammability	Physical Hazards	Personal Protection
	0	1	0	Not determined

Issue Date: 08-Jan-2015

Revision Date: 20-Jan-2015

Revision Note: New format

Disclaimer

The information provided in this Safety Data Sheet is correct to the best of our knowledge, information and belief at the date of its publication. The information given is designed only as a guidance for safe handling, use, processing, storage, transportation, disposal and release and is not to be considered a warranty or quality specification. The information relates only to the specific material designated and may not be valid for such material used in combination with any other materials or in any process, unless specified in the text.

End of Safety Data Sheet

- Anexo 10. Fibra de carbono. [25]

**TECHNICAL
DATA SHEET**
No. CFA-001

TORAYCA®

T300 DATA SHEET

Baseline carbon fiber used in aerospace applications. Has 30 year production history and is known for its balanced composite properties, high quality, consistency, reliability and supplyability.

F I B E R P R O P E R T I E S

		English	Metric	Test Method
Tensile Strength		512 ksi	3,530 MPa	TY-030B-01
Tensile Modulus		33.4 Msi	230 GPa	TY-030B-01
Strain		1.5 %	1.5 %	TY-030B-01
Density		0.064 lbs/in ³	1.76 g/cm ³	TY-030B-02
Filament Diameter		2.8E-04 in.	7 µm	
Yield	1K	22,568 ft/lbs	66 g/1000m	TY-030B-03
	3K	7,523 ft/lbs	198 g/1000m	TY-030B-03
	6K	3,761 ft/lbs	396 g/1000m	TY-030B-03
	12K	1,862 ft/lbs	800 g/1000m	TY-030B-03
Sizing Type & Amount	40A, 40B		1.0 %	TY-030B-05
	40D		0.7 %	TY-030B-05
	50A, 50B		1.0 %	TY-030B-05
Twist		Twisted, Untwisted, or Never twisted		

F U N C T I O N A L P R O P E R T I E S

CTE	-0.41 $\alpha \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Specific Heat	0.19 Cal/g $^\circ\text{C}$
Thermal Conductivity	0.025 Cal/cm $\cdot\text{s} \cdot ^\circ\text{C}$
Electric Resistivity	1.7 x 10 ⁻³ $\Omega \cdot \text{cm}$
Chemical Composition: Carbon	93 %
Na + K	<50 ppm

C O M P O S I T E P R O P E R T I E S *

Tensile Strength	270 ksi	1,860 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	20.0 Msi	135 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.3 %	1.3 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	215 ksi	1,470 MPa	ASTM D-695
Flexural Strength	260 ksi	1,810 MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus	18.0 Msi	125 GPa	ASTM D-790
ILSS	14 ksi	10 kgf/mm ²	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	11.0 ksi	76 MPa	ASTM D-3039

* Toray 250°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.

TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.

T300

COMPOSITE PROPERTIES**

Tensile Strength	255 ksi	1,760 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	19.5 Msi	130 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.3 %	1.3 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	230 ksi	1,570 MPa	ASTM D-695
Compressive Modulus	18.5 Msi	125 GPa	ASTM D-695
In-Plane Shear Strength	14 ksi	98 MPa	ASTM D-3518
ILSS	15.5 ksi	11 kgf/mm ²	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	11.5 ksi	80 MPa	ASTM D-3039

** Toray Semi-Toughened 350°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.

See Section 4 for Safety & Handling Information. The above properties do not constitute any warranty or guarantee of values. These values are for material selection purposes only. For applications requiring guaranteed values, contact our sales and technical team to establish a material specification document.

PACKAGING

The table below summarizes the tow sizes, twists, sizing types, and packaging available for standard material. Other bobbin sizes may be available on a limited basis.

Tow Sizes	Twist ¹	Sizing	Bobbin Net Weight (kg)	Bobbin Type ²	Bobbin Size (mm)					Spools per Case	Case Net Weight (kg)
1K	A	40A, 50A	1.0	I	94	99	320	135	260	15	15
	A	40A, 50A	1.0	II	76	82	192	132	156	16	16
	B	50B	1.0	II	76	82	192	132	156	16	16
3K	A	40A, 50A	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
	B	40B, 50B	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
6K	A	40D, 50A	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
	B	40D, 50B	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
12K	A	50A	4.0	II	76	82	192	204	156	6	24
	B	50B	4.0	II	76	82	192	204	156	6	24

¹ Twist A: Twisted yarn B: Untwisted yarn made from a twisted yarn through an untwisting process

² Bobbin Type See Diagram below



TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.

6 Hutton Centre Drive, Suite #1270, Santa Ana, CA 92707 TEL: (714) 431-2320 FAX: (714) 424-0750
Sales@Toraycfa.com Technical@Toraycfa.com www.torayusa.com